



TITLE:

塩素固定化材を用いた断面修復材
と犠牲陽極材を併用した断面修復
工法の鉄筋防食性能に関する研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

宮口, 克一

CITATION:

宮口, 克一. 塩素固定化材を用いた断面修復材と犠牲陽極材を併用した
断面修復工法の鉄筋防食性能に関する研究. 京都大学, 2015, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2015-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18691>

RIGHT:

塩素固定化材を用いた断面修復材と
犠牲陽極材を併用した断面修復工法の鉄筋防食性能に関する研究

宮口 克一

第1章 序論

- 1.1 研究の背景 . . . 1
- 1.2 研究の目的 . . . 1
- 1.3 論文の構成 . . . 3

第2章 既往の研究

- 2.1 塩害によるコンクリート中の鋼材の腐食反応 . . . 6
- 2.2 劣化したコンクリート構造物の断面修復工法 . . . 7
- 2.3 コンクリート構造物の塩害劣化に対するコンクリート混和材の効果 . . . 12
- 2.4 コンクリート構造物の電気化学的防食工法 . . . 17
 - 2.3.1 コンクリート構造物の電気化学的防食工法の原理 . . . 17
 - 2.3.2 コンクリート構造物の電気化学的防食工法の防食基準 . . . 18
 - 2.3.3 コンクリート構造物の電気化学的防食工法の種類 . . . 19
 - 2.3.4 犠牲陽極材を用いた鉄筋コンクリート構造物の電気化学的防食工法 . . . 20
 - 2.3.5 流電陽極方式の電気化学的防食工法の数値解析 . . . 22
- 2.5 本研究で取り上げる課題 . . . 23

第3章 カルシウムアルミネートを主成分とする塩素固定化材を用いた断面修復材

- 3.1 はじめに . . . 27
- 3.2 セメント種類や粒度分布が異なる塩素固定化材を用いた場合のセメント硬化体の基礎物性 . . . 28
 - 3.2.1 使用材料 . . . 28
 - 3.2.2 試験方法 . . . 29
 - 3.2.3 試験結果 . . . 30
 - 3.2.4 本節のまとめ . . . 32
- 3.3 塩素固定化材を混和したポリマーセメントモルタルの基礎物性 . . . 33
 - 3.3.1 使用材料および試験配合 . . . 33
 - 3.3.2 試験方法 . . . 34
 - 3.3.3 試験結果 . . . 35
 - 3.3.4 本節のまとめ . . . 37
- 3.4 塩素固定化材を混和したモルタルと内在塩分を有するコンクリートを打ち継いだ場合の打継ぎ界面付近の鉄筋腐食および塩化物イオン移動挙動 . . . 37
 - 3.4.1 使用材料および試験配合 . . . 37
 - 3.4.2 試験方法 . . . 39
 - 3.4.3 試験結果 . . . 40
 - 3.4.4 本節のまとめ . . . 48
- 3.5 塩化物イオンを混和したコンクリートと塩素固定化材を混和した断面修復材を打ち継いだ時の塩化物イオン拡散挙動の解析的検討 . . . 48
 - 3.5.1 はじめに . . . 48
 - 3.5.2 塩化物イオンの固定化を考慮した解析モデル . . . 49
 - 3.5.3 固定化の割合と上限値 . . . 58

- 3.5.4 実験結果の再現 . . . 62
- 3.5.5 断面修復工法を想定したケーススタディ . . . 69
- 3.5.6 本節のまとめ . . . 75
- 3.5 本章のまとめ . . . 75

第4章 犠牲陽極材を併用した断面修復工法における鉄筋防食性能

- 4.1 はじめに . . . 78
- 4.2 コンクリートの圧縮強度が犠牲陽極材の防食性能に与える影響 . . . 79
 - 4.2.1 使用材料および試験配合 . . . 79
 - 4.2.2 試験方法 . . . 82
 - 4.2.3 試験結果 . . . 86
 - 4.2.4 本節のまとめ . . . 109
- 4.3 コンクリート中の塩化物イオン量が犠牲陽極材の防食性能に与える影響 . . . 110
 - 4.3.1 使用材料, 試験配合および試験方法 . . . 110
 - 4.3.2 試験結果 . . . 111
 - 4.3.3 本節のまとめ . . . 131
- 4.4 断面修復材の種類が犠牲陽極材の防食性能に与える影響 . . . 131
 - 4.4.1 使用材料, 試験配合および試験方法 . . . 131
 - 4.4.2 試験結果 . . . 132
 - 4.4.3 本節のまとめ . . . 140
- 4.5 犠牲陽極材の鉄筋防食性能の評価手法 . . . 140
 - 4.5.1 鉄筋質量減少率と各パラメータの比較 . . . 140
 - 4.5.2 犠牲陽極材の鉄筋防食効果の評価指標 . . . 142
 - 4.5.3 本節のまとめ . . . 145
- 4.6 犠牲陽極材の防食効果の数値解析 . . . 145
 - 4.6.1 数値解析手法について . . . 145
 - 4.6.2 数値解析の結果 . . . 149
 - 4.6.3 犠牲陽極材が消耗した場合の電位・電流密度の解析 . . . 153
 - 4.6.4 犠牲陽極材を用いた防食工法の耐久性 . . . 155
 - 4.6.5 本節のまとめ . . . 159
- 4.7 本章のまとめ . . . 159

第5章 結論

- 5.1 本研究で得られた結論 . . . 162
- 5.2 塩害劣化を受けるコンクリート構造物の断面修復工法の選定に関するシナリオデザイン . . . 165

第1章 序論

1.1 研究の背景

我が国には道路橋（2 m以上）は全国に約70万橋、道路トンネルは約1万本存在する。そのうち、高度経済成長期以降に集中的に整備した橋梁やトンネルが、今後大量に補修を検討しなければならない時期に入る。建設後50年経過する施設が全体に占める割合は、道路橋については、10年後には43%、20年後に67%になると見込まれ、トンネルについても10年後には34%、20年後には50%になると見込まれている¹⁾。

高度経済成長期に緊急的に整備された箇所や、沿岸部、水中部など立地環境の厳しい

場所などでは、近年、一部の施設で老朽化による変状が顕在化している。一方で、適時適切な補修・補強により、建設後80年を経過しても大きな損傷なく使われている橋梁も多く存在する²⁾。

また、地方公共団体が管理する橋梁では、老朽化の進行等により、通行止めや車両重量等の通行規制を実施している橋梁数が、最近5年間で2倍以上に増加している³⁾。さらに、トンネルや高架橋におけるコンクリート片落下や深刻な劣化による橋梁の架け替え工事も毎年のように発生している。

維持管理の面においては、日本は歴史的に木で橋を建設してきており、洪水による流出、火災などにより架け替えを行うことが普通であった。鉄筋コンクリートでの橋の整備が本格化したのは1960年代であり、当時、一般的にはメンテナンスフリーと考えられていたことから、その維持管理の必要性が十分認識されていなかった。

メンテナンスフリーと考えられていた鉄筋コンクリート構造物も維持管理を怠れば劣化する可能性が高い。コンクリート構造物の劣化の要因のうち、塩害はわが国において主要な劣化要因の一つとして挙げられる。海岸部の橋梁は海からの飛来塩分により深刻な被害がもたらされることがある。また、寒冷地では、道路の凍結防止のために散布される塩化カルシウムや塩化ナトリウムにより道路橋の床版が劣化することが多く報告されている。

これらのことから、橋梁などのコンクリート構造物において、維持管理のための点検整備は必

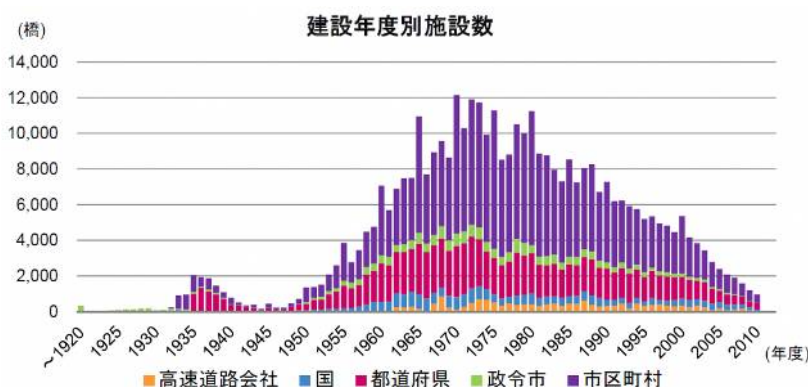


図1.1.1 建設年度別施設数（道路橋）

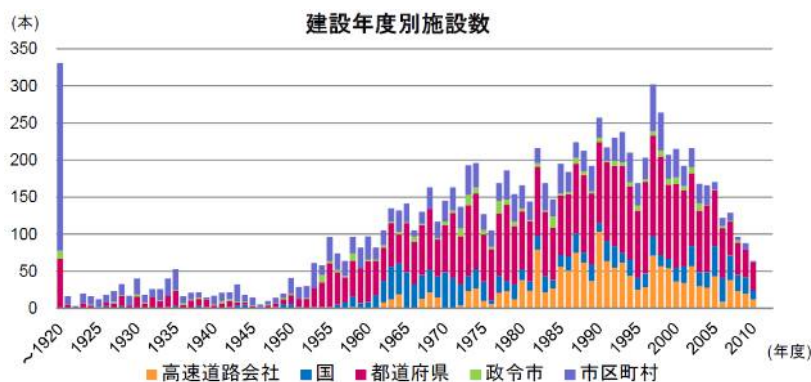


図1.1.2 建設年度別施設数（道路トンネル）

須の項目となってきた。点検整備で変状を発見した場合は、適切な補修・補強を行わなければならないが、不適切な工法選択により、一度補修を行った箇所が再劣化する事例も散見され、維持管理から補修対策までのシナリオデザインの確立が必要となってきた。

1.2 研究の目的

一般的なコンクリート構造物の維持管理の基本フロー

⁴⁾ を図 1.2.3 に示す。コンクリート構造物の維持管理を行っている供用期間中は、定期的に点検・調査を行い、その結果、劣化や変状を発見した場合は、その変状箇所の予測・評価を行い、対策方法を決定し、対策を実施する。

2000年代に相次いで生じたコンクリート構造物の劣化に起因するコンクリート片のはく落や、鋼材の破断により、コンクリート構造物の維持管理に関して様々な取組みがなされてきている。しかし、選択した対策（例えば、断面修復工法による補修）の長期耐久性については、まだ不明確な点が多い。

そこで本研究では、我が国のコンクリート構造物の主要な劣化要因の一つである塩害を受けたコンクリート構造物をとりあげ、その対策について検討を行う。対策と

しては、塩害を受けたコンクリート構造物の一般的な対策のひとつである、断面修復工法を検討の対象とした。この塩害を受けたコンクリート構造物の断面修復工法について、より耐久性を高める方法についての検討を行い、長期耐久性について検討を行った。

断面修復工法の耐久性を高める方法として、断面修復工法に用いる断面修復材に、塩害の劣化因子となる塩化物イオンの侵入を抑制できると考えられる塩素固定化材を混和した断面修復工法を検討した。さらに断面修復工法を模擬して、塩化物イオンを含んだコンクリートと塩素固定化材を混和した断面修復材を打ち継いだ際の塩化物イオンの拡散挙動について、実験的および数値解析的に検討を行った。

一方、断面修復工法を、塩害を受けたコンクリート構造物に適用すると、断面修復部と躯体コンクリート部の塩化物イオン量の違いによって、打継面を貫通する鉄筋に比較的早期にマクロセル腐食が生じることが指摘されている⁵⁾。その対策として用いられる、断面修復部に犠牲陽極材を埋め込む犠牲陽極工法に着目し、その鉄筋防食効果の適用範囲の明確化を試みた。さらに、犠牲陽極材の設置位置を躯体コンクリートの表面に設置する方法や躯体コンクリート表面に設置する犠牲陽極材部に被膜養生材を塗布して保湿性を高める方法について試験を実施し、その鉄筋防食効果について検討を行った。

これらの検討を通じて、塩害を受けるコンクリート構造物の断面修復工法について、経済的かつ効果的な断面修復工法の仕様選定のフローを提案することが本研究の目的である。

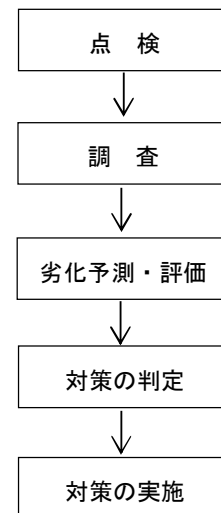


図 1.2.3 コンクリート構造物の維持管理の基本的フロー

1.3 論文の構成

本論文は全5章からなる。

第1章「序論」では、研究の目的および論文の構成を示す。

第2章「既往の研究」では、塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物の断面修復工法に関して、断面修復材に求められる性能、マクロセル腐食のメカニズム、コンクリート混和材による塩害対策、コンクリート構造物の電気化学的防食工法ならびに犠牲陽極工法についての既往の研究をまとめた。

第3章「カルシウムアルミネートを主成分とする塩素固定化材を用いた断面修復材」では、カルシウムアルミネートを主成分とする塩素固定化材について、まず、混和するセメント種類が異なる場合や塩素固定化材の粒度分布を制御した場合の基礎物性について述べる。次に、一般的な断面修復材として用いられるポリマーセメントモルタルに塩素固定化材を混和した場合の基礎物性について述べる。さらに、塩害を受けたコンクリート構造物の断面修復工法を模擬し、塩化物イオンを含んだコンクリートと塩素固定化材を混和した断面修復材とを打ち継いだ供試体を作製し、打継界面における塩化物イオンの拡散挙動について、実験的に検討した。さらにその結果を用いて、数値解析的な検討を行い、そのモデルを使って、塩素固定化材を混和した断面修復工法を適用した場合の効果の範囲および耐久性について、数値解析的に検討を行った。

第4章「犠牲陽極材を併用した断面修復工法における鉄筋防食性能」では、塩害を受けたコンクリート構造物の断面修復工法を模擬した鉄筋コンクリート供試体を作製し、打継界面近傍の鉄筋のマクロセル腐食を抑制する目的で、犠牲陽極材を設置した。その供試体を用いて、躯体コンクリート強度や躯体コンクリート中の塩化物イオン量が犠牲陽極材の鉄筋腐食抑制性能におよぼす影響について評価した。

断面修復工法と併用する犠牲陽極材の鉄筋防食性能について、躯体コンクリート強度、躯体コンクリート中の塩化物イオン量、暴露環境温度の条件の違いや、犠牲陽極材の設置位置を従来の断面修復材内部に設置したものと躯体コンクリートの外部に設置したものによる違い、および、断面修復材に塩素固定化材を混和したものをを用いた場合について、どのような影響を受けるかを実験的に検討した。また、断面修復工法と併用する犠牲陽極材の鉄筋防食性能の評価基準について、分極抵抗値、復極量、防食電流密度、鉄筋腐食電流の値と鉄筋腐食率とを検討することで、評価検討を行った。さらに、犠牲陽極材の鉄筋防食性能について数値解析を行い、数値解析の妥当性について検討を行った。さらに犠牲陽極材の耐久性について、犠牲陽極材が消耗した状態を想定した鉄筋防食性能の数値解析検討を通じて評価検討を行った。

第5章「結論」では、本研究で得られた結論を総括するとともに、各章で得られた知見を基に、塩害を受けたコンクリート構造物の断面修復工法について、効果的かつ経済的な工法の仕様についての提案を行い、本研究のまとめとした。

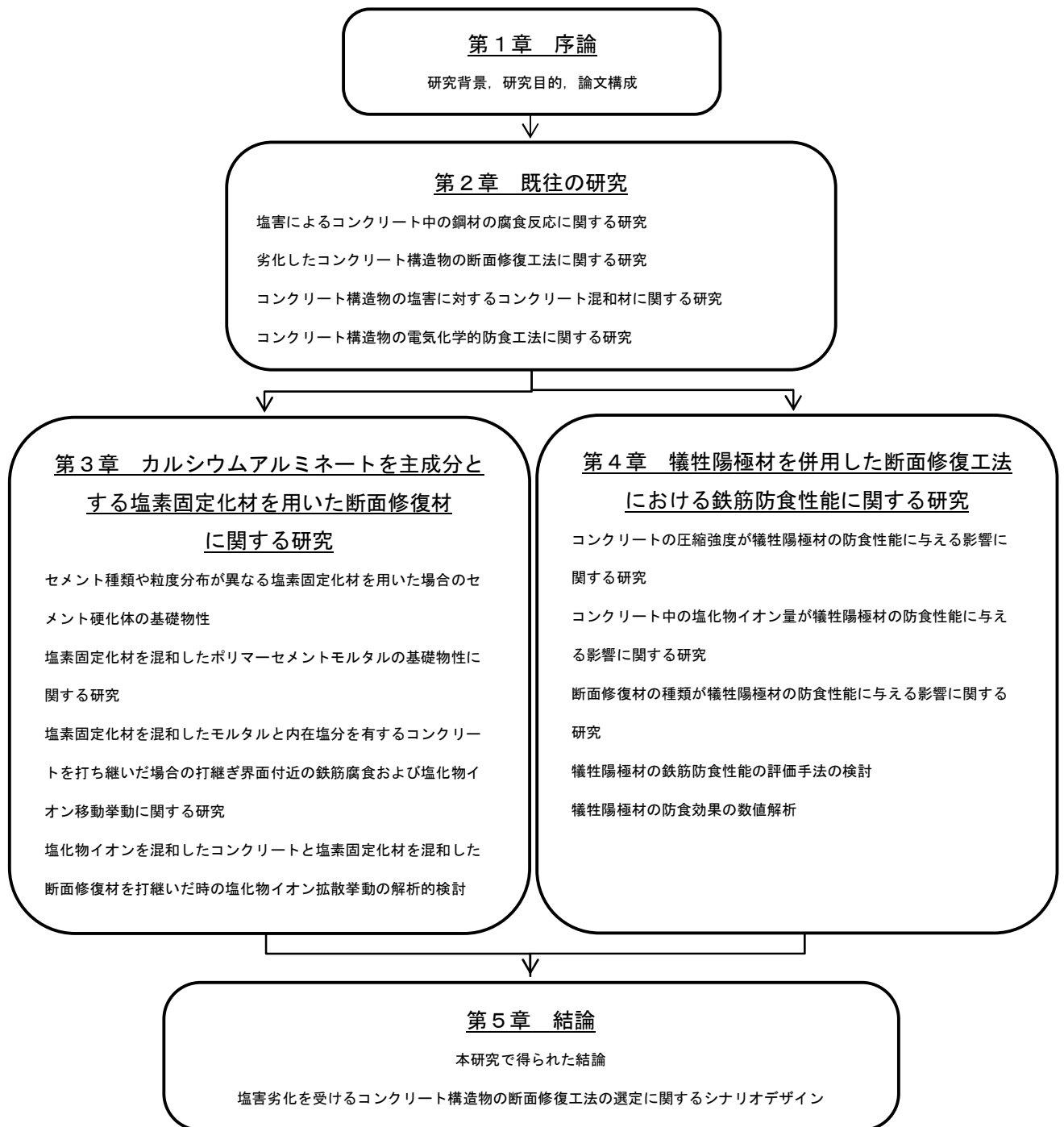


図 1.2.2 本論文の構成

【参考文献】

- 1) 国土交通省：平成 25 年度国土交通白書，2014
- 2) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会(335 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演概要集，2008
- 3) 国土交通省：社会資本整備審議会道路分科会資料 <https://www.mlit.go.jp/common/001032295.pdf>, 2013

- 4) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'14 [基礎編]，2014
- 5) 土木研究所：塩害環境下にあるコンクリート中のマクロセル腐食生成機構，2009

第2章 既往の研究

2.1 塩害によるコンクリート中の鋼材の腐食反応

世界で6番目に長い約35,000kmもの海岸線を有するわが国において、コンクリート構造物の塩害による劣化は、避けて通ることのできない課題となっている¹⁾。また、海岸近くの構造物だけでなく、主に道路橋において冬期の凍結防止剤散布によるコンクリート構造物の劣化も深刻化している²⁾。

コンクリート構造物の塩害とは、コンクリート標準示方書³⁾では、「コンクリート中における塩化物イオンの存在により、コンクリート中の鋼材の腐食が進行し、腐食生成物の体積膨張によりコンクリートのひび割れや剥離・剥落、あるいは鋼材の断面減少が生じ、ひいては構造物の性能低下につながる現象のことをいう」と定義されている。また、塩害を受ける構造物の劣化過程は表2.1.1に示すように、潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分けられる³⁾。

表 2.1.1 塩害の各劣化過程の定義³⁾

劣化過程	定義	期間を決定する主要因
潜伏期	鋼材の腐食が開始するまでの期間	塩化物イオンの拡散，初期含有塩化物イオン濃度
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	鋼材の腐食速度
加速期	腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度
劣化期	腐食量の増加により耐力の低下が顕著な期間	

図2.1.1に示す塩害劣化の進行過程⁴⁾から明らかなように、コンクリート表面にひび割れ等の変状が現れた時では、すでに多くの塩化物イオンがコンクリート中に浸透し、内部鋼材が相当量腐食していることになる。さらに一旦ひび割れが発生し、塩分や水分などが直接鋼材表面に達する状態では、鋼材腐食が加速度的に進行する。このことから、塩害対策としては、鋼材の腐食を防ぎ、劣化が加速度的に進行する前の段階でとどめることが重要となる。

コンクリート中の鉄筋は、pH=12以上の高アルカリ環境の中にあるため、その表面には酸化物等からなる不動態被膜が形成され安定な状態にあるとされている。しかし、コンクリート練混ぜ時に塩化物イオンを含む材料を使用した場合や、外部から塩化物イオンが浸透した場合など、コンクリート中にある程度以上の塩化物イオンが含まれると、鉄筋表面の不動態被膜が破壊され、鉄筋の酸化が始まる。既往の研究⁵⁾では、図2.1.2に示されるような腐食電池が形成されるた

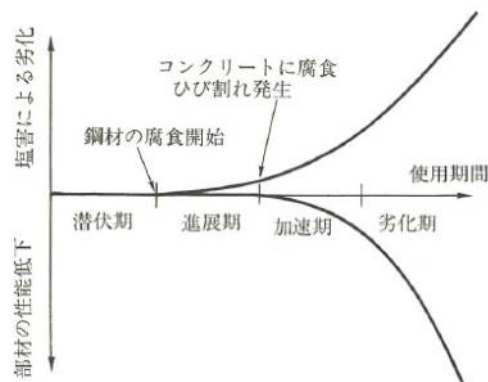


図 2.1.1 塩害劣化の進行過程⁴⁾

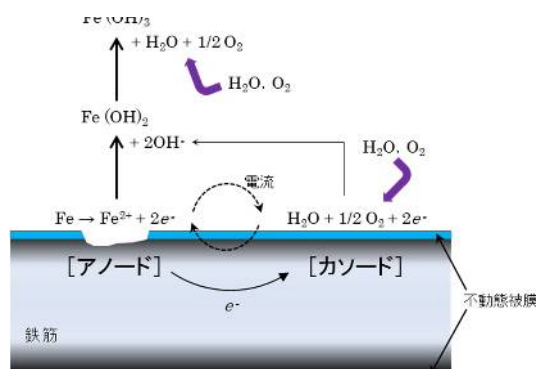


図 2.1.2 鉄筋腐食反応の概要⁵⁾

めと説明している．この反応は，電子の移動と化学反応を含む電気化学反応である．金属鉄は，アノード部において Fe^{2+} となって溶解する ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$)．このとき生じた電子は鉄筋内部を通過してカソード部へ移動し，水と酸素から OH^- を形成する ($\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$)．水酸化物イオンはカソード部からコンクリート内部を通過してアノード部に移動し， Fe^{2+} と反応して $\text{Fe}(\text{OH})_2$ を形成する． $\text{Fe}(\text{OH})_2$ はさらに溶存酸素と水と反応して $\text{Fe}(\text{OH})_3$ を生成する．その後，さらに脱水などを経て FeOOH や Fe_2O_3 となり，さらに一部は酸化が不十分なままの Fe_3O_4 を形成する．この錆層は，多孔質で腐食を抑制する効果が小さく，腐食は絶えず進行する．また，鋼材の錆は体積変化が大きく，元の鉄の約 2.5 倍の体積となるため，この膨張圧によってコンクリートにひび割れや剥離が生じ，さらに腐食を進行させることになる．

高谷ら⁶⁾ は，図 2.1.3 に示すように，コンクリート構造物に発生する錆について，腐食環境条件の違いによって異なることを明らかにしている．つまり，鉄筋の腐食生成物には，水や酸素，pH，酸化速度などが複雑に関与しており，腐食生成物はひび割れの前後で異なると考えられる．Goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) や Magnetite (Fe_3O_4) は高アルカリ性環境のコンクリート中で生成される可能性が高いが，Akaganeite ($\beta\text{-FeOOH}$) や Lepidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$) はひび割れ発生前は生成される可能性は低い．また，鉄筋コンクリートの電食試験に

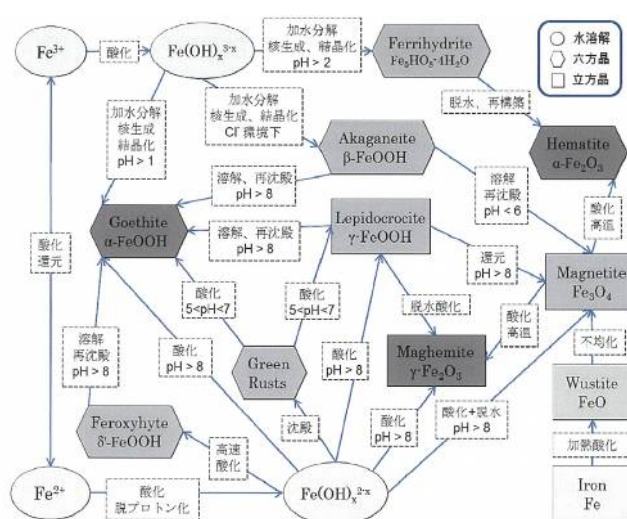


図 2.1.3 鉄筋腐食生成物の反応経路⁶⁾

におけるひび割れ発生腐食量が，促進・暴露試験よりも小さくなる原因として，体積膨張率の大きい塩化酸化鉄（Ⅲ）カルシウムが生成されるためであるとしている．これが実環境で生成するのかは今後の検討課題としているが，環境条件によっては想定よりも早期に鉄筋腐食によるひび割れが発生する可能性を指摘している．

塩化物イオンが不動態を破壊する機構についてはいくつかの説があるが，例えば不動態被膜中で化学吸着している酸素原子や水分子中に塩化物イオンが割り込み，この部分で被膜が破壊される，などと説明されている⁷⁾．さらに，塩化物イオンが存在するとコンクリートの電気抵抗を低下させ，腐食反応を促進する⁸⁾ など，塩化物イオンの存在が鉄筋の腐食に与える影響は非常に大きい．

2.2 劣化したコンクリート構造物の断面修復工法

断面修復工法は，コンクリート構造物の補修を行う場合の最も一般的な工法の一つであり，土木学会「表面保護工法設計施工指針（案）⁹⁾」では，「中性化，塩害，凍害，化学的侵食，アルカリ骨材反応などによる劣化または損傷によって喪失したコンクリート構造物の断面や，塩化物イオン，二酸化炭素などの劣化因子を許容限度以上含むコンクリート部分を除去した後の構造物の断面を，当初の断面寸法に復旧し，コンクリート構造物の要求性能に基づく修復水準に応じて，

コンクリート構造物の耐久性能を回復もしくは向上させる表面保護工法」と定義されている。

また現在、同工法に使用する断面修復材はいわゆるポリマーセメントモルタル（以下、PCMと称する）が広く使用されている。本節ではPCMを断面修復材とした際の断面修復工法について概説する。

コンクリート構造物の補修工法に用いる断面修復材に一般的に求められる性能を図2.2.1¹⁰⁾に示し、図2.2.1に示した項目ごとに概略を説明する。

① 躯体との一体性：コンクリート躯体と断面修復材との一体性を確保することは、断面修復後もコンクリート構造物として運用する上で必要となる。一体性が不足すると、断面修復部の剥離などが懸念され、所定の補修効果が発揮できないばかりか、第三者被害をも引き起こす可能性が考えられる。

② 劣化因子の抑制性：一般的に対象となる劣化要因とは「二酸化炭素の浸透」および「塩化物イオンの浸透」である。これらはいずれも鉄筋の腐食を引き起こす要因となるものである。また、凍害や水路等の補修に使用される際には耐水性についても求め

られることが多い。これらの性能が不足すると、想定よりも早期に再びひび割れ等の劣化が顕在化することとなり、構造物の寿命を長くするという補修の目的を喪失することになる。

③ 断面修復材自体の耐久性：断面修復材は外部環境から「乾燥」「温冷繰返し」「凍結融解繰返し」などの影響を受ける。これらの影響に対する断面修復材自体の耐久性の不足は、断面修復材にひび割れや強度低下を引き起こし、構造物自体の耐久性にまで影響を与える。

④ 施工性：一般に断面修復材の施工方法は施工の規模によって「コテ塗り」、「吹き付け」および「流し込み」から選定される。どの施工方法においても、施工方法に合致した、スムーズに施工が行われるような適度なワーカビリティをもつことが重要である。また、コテ塗りおよび吹き付け施工では、断面修復材が一度の施工で適度な厚みで施工できる厚塗り性を有することも必要な性能である。これらが不足すると施工に必要以上の時間がかかり経済的でなくなることや、施工品質の低下が懸念される。

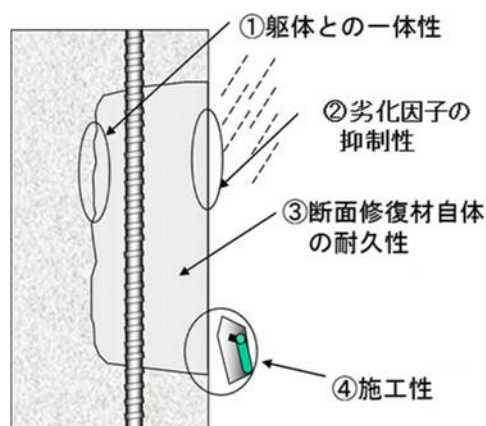


図2.2.1 断面修復材に求められる性能

PCMとは、通常のセメントモルタルにセメント混和用ポリマーディスパージョンや再乳化型粉末樹脂が混合されたモルタルである。一般にPCMは、混和されたポリマー成分により、曲げおよび引張強度、接着性などの力学的性質、中性化抵抗性および塩化物イオン浸透抵抗性などの耐久性が向上する。一般に断面修復材として用いられるセメントモルタル（CM）、ポリマーモルタル（PM）と併せて断面修復工に期待される効果との関係を表2.2.1に列挙する⁹⁾。

表 2.2.1 断面修復工に期待される効果と断面修復材との関係⁹⁾

期待される主な効果	要求性能	断面修復材の種類		
		セメント モルタル	ポリマーセメント モルタル	ポリマー モルタル
劣化因子および劣化部の除去 および劣化・損傷断面の修復	①力学的性能	○	○	○
	②ひび割れ抵抗性	△	○	△
修復された断面における劣化 因子の侵入抑制・防止効果	①中性化抑制	○	○	○
	②塩化物イオンの侵入抑制	△	△	○
	③凍結融解抵抗性	○	○	○
	④化学的侵食抑制	△	△	○
	⑤アルカリ骨材反応抑制 ^{#1}	△	△	○
美観・景観	美観・景観に関する性能	△	△	○
第三者影響度に関する性能	はく落抵抗性 ^{#2}	○	○	○

注) 表中の○は適用対象、△は適用する場合検討が必要(他の工法との併用など)、ーは適用対象外を示す。#1のアルカリ骨材反応抑制は、標準的な遮水性により判定した。#2は付着性を基本とした判定。

P CMがこれらの特徴を示すのは、モルタル中にポリマーフィルムが形成されることによるところが大きいとされている¹¹⁾。モルタルの練混ぜ直後から硬化までの過程でどのようにポリマーがモルタル硬化体組織内にポリマーフィルムを形成するかについての模式図を図 2.2.2

に示す¹¹⁾。また、P CM硬化体内部に形成されたポリマーフィルムの例を写真 2.2.1 に示す¹²⁾。

図 2.2.2 より、①練混ぜ直後ではポリマー粒子がセメント粒子および骨材の間に分散し、ポリマー粒子やポリマーディスパージョンに含まれる界面活性剤の影響によって、ワーカビリティや保水性が改善される。②材齢3時間程度になると、ポリマー粒子がセメント粒子や骨材の表面に沈着・凝集を始める。③材齢12時間程度では、セメントの水和が進行し、セメント水和物の成長が顕著になる。この時期にセメント粒子や骨材の表面に凝集していたポリマー粒子は融着を始め、セメント水和物の間隙を埋めるようにポリマーフィルムの形成が開始される。④材齢24時間以降は、セメント水和物とポリマーフィルムが相互に間隙を埋めるような形で緻密な組織が形成される。このようにし

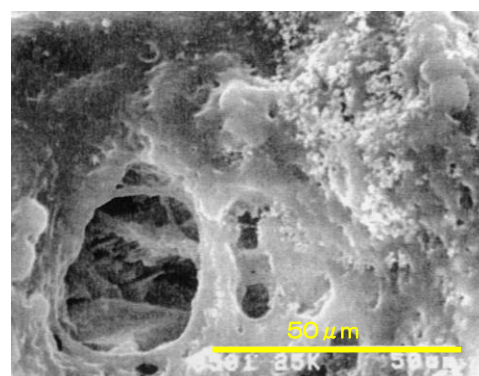
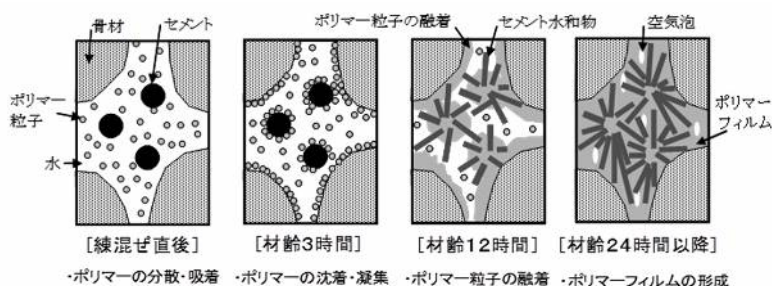


写真 2.2.1 P CM硬化体に形成されたポリマーフィルム¹²⁾

てセメント硬化体内部に形成されたポリマーフィルムはモルタルの曲げ強度，引張強度，付着強度を向上させ，塩化物イオン，二酸化炭素等の劣化因子の浸透を遮断する効果を発揮する。

一方，坂井ら¹³⁾は，PCM中のポリマーエマルジョンおよび粉末状ポリマーのいずれを混和した場合もセメント粒子の間に球状のポリマー粒子が個々に独立して充填し，硬化後はこのポリマー粒子を取り囲むように水和物が生成していることを確認し，PCMの複合化機構としては粒子分散型を考慮する必要があるとしている．これによるとPCMの曲げ強度が向上する理由として硬化体中に分散しているポリマー粒子が強化粒子として働き，その粒子間距離が小さくなると硬化体中を進む亀裂の伝搬経路が複雑になるためとしている．PCM供試体表面でのポリマーフィルムの形成は認められたが，PCMの複合化機構における骨材やセメント粒子の界面での皮膜形成の有無についてはさらに検討が必要であるとしている．

PCMに使用されるセメント混和用ポリマーの種類としては，スチレンブタジエンゴム（SBR），ポリアクリル酸エステル（PAE），スチレンアクリル酸エステル（SAE），エチレン酢酸ビニル（EVA）などが主に用いられている．また，PCMを現場で使用する際には，あらかじめセメントと骨材等が一定の割合で調合（プレミックス）された製品が広く用いられている．プレミックスされた製品は工場生産されるため，品質の安定化，均一性の向上が容易に図れる．

また，一般的に用いられるPCMの断面修復材の性能範囲を表2.2.2に示す⁹⁾．

表 2.2.2 一般的な断面修復材（ポリマーセメントモルタル）の性能範囲

種類	施工	W/B (%)	P/B (%)	該当数	硬化時間 (h:時間)	比重 (g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)				付着強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	線膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C)	収縮 (×10 ⁻⁶)
							3時間	1日	7日	28日						
PCM	左官	25~60	3~15	13	3~8h	1.8~2.2		5~25	20~40	25~60	1.8~3.4	16~21	7~12	3~6	8~17	200~800
		25~70	7~15	7	~10h	1.3~1.6		3~25	5~30	10~35	1.8~2.6	12~15	3~8		9~13	200~700
		35~55	5~20	5	0.5~2h	1.8~2.1	3~15	10~30	20~40	25~40	2.0~2.8	13~21	8~10		10~15	300~800
	吹付け	30~60	3~10	11	3~8h	1.5~2.2		5~15	20~40	30~60	2.0~3.5	14~21	7~10	3~6	9~17	350~800
		30~40	5~10	2	~15h	2.1~2.2		5~10	15~40	25~50	2.0~2.3	17~21	8~10			300~500

一方，断面修復工法を実施した場合，断面修復部と躯体コンクリート部を貫通する鉄筋にマクロセル腐食が生じる場合があることが指摘されている．既往の研究¹⁴⁾におけるマイクロセルおよびマクロセル腐食の概念図を図2.2.3に示す．

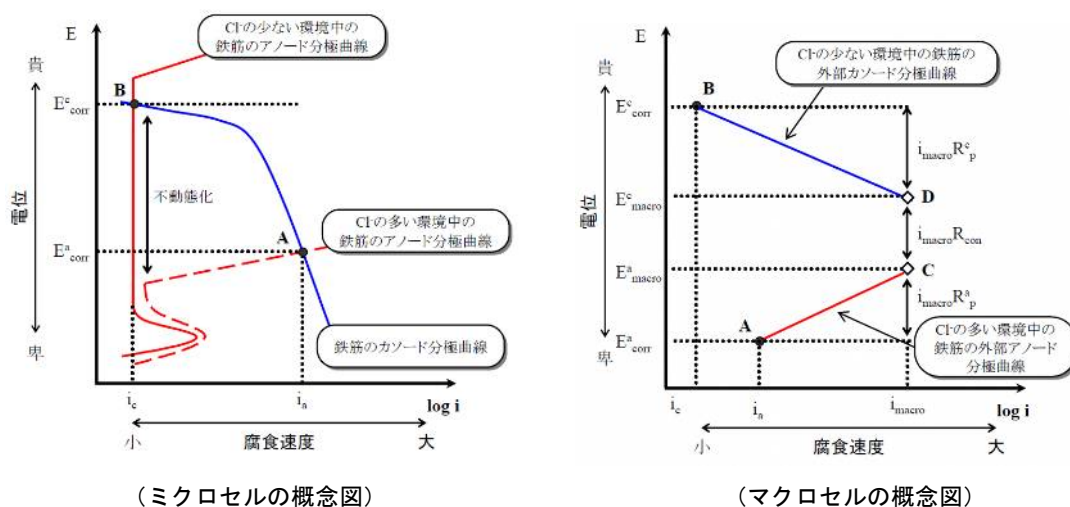


図 2.2.3 ミクロセルおよびマクロセル腐食の概念図¹⁴⁾

図2.2.3において、マイクロセル腐食による鉄筋腐食は、アノード分極曲線とカソード分極曲線の交点で腐食反応が進む。点Aは、塩化物イオンの多い環境中の鉄筋の腐食反応を示す点であり、自然電位は E^a_{corr} 、腐食電流は i_a となる。一方、点Bは塩化物イオンの少ない環境中の鉄筋の腐食反応を示す点であり、自然電位は E^c_{corr} 、腐食電流は i_c となる。酸素の供給量が同じである場合、塩化物イオンの多い環境中では自然電位は卑になり腐食速度も大きくなるが、塩化物イオンの少ない環境中では自然電位は貴になり腐食速度も小さくなる。

一方、マクロセル腐食は、腐食環境にある鉄筋と腐食環境にない鉄筋が電氣的に接続された状態で生じる。ここでは、先に示した塩化物イオンの

多い環境中の鉄筋と塩化物イオンの少ない環境中の鉄筋が電氣的に接続されていることを想定している。塩化物イオンの多い環境中の鉄筋ではアノード反応が卓越し、逆に塩化物イオンの少ない環境中の鉄筋はカソード反応が卓越する。マクロセル腐食においても両者の反応速度は一致するため、外部分極曲線の交点で自然電位と腐食速度が決まる。しかし、コンクリート中の鉄筋では、アノード部とカソード部との間にコンクリートが存在するため、コンクリート抵抗 R_{con} によって電位に差が生じる。これを iR ドロップと呼ぶ。ここで、アノード部とカソード部の自然電位は分極し、アノード部はC点で、カソード部はD点で腐食反応が進む。このため、自然電位はアノード部で貴に、カソード部で卑に変化する

(図2.2.3では、 E^a_{corr} が E^a_{macro} へ、 E^c_{corr} が E^c_{macro} へシフトする)。また、マイクロセル腐食と比較して、マクロセル腐食の進行速度は速くなると考えられる(図2.2.3では、 i_a が i_{macro} へシフト)。

飯島ら¹⁵⁾は、分割鉄筋を用いた鉄筋コンクリート供試体を作製し、市販のポリマーセメントモルタルと塩化物イオン量を1~5kg/m³まで混和したコンクリートを打継いだ際のマクロセル腐食電流密度を測定している。図2.2.4に示すように、打継界面付近の躯体コンクリート側の分割鉄筋には、大きなマクロセル腐食電流が認められ、その値はマイクロセル腐食の2倍に達するものであった。つまり、図2.2.3で示したようにマクロセル腐食の進行速度は、通常マイクロセル腐食に比べて速くなることが十分にありうることを示している。

一方、宮里ら¹⁶⁾は、分割鉄筋を用いた供試体を

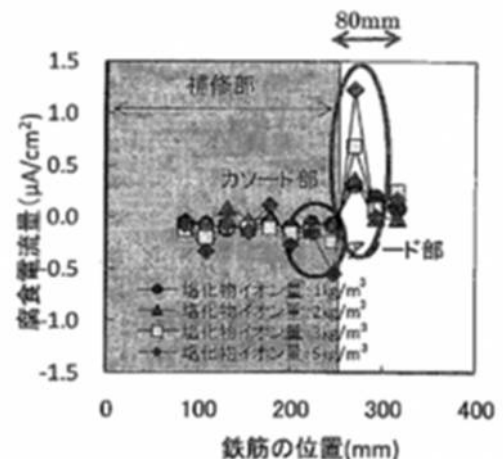


図2.2.4 断面修復界面付近のマクロセル腐食電流密度¹⁵⁾

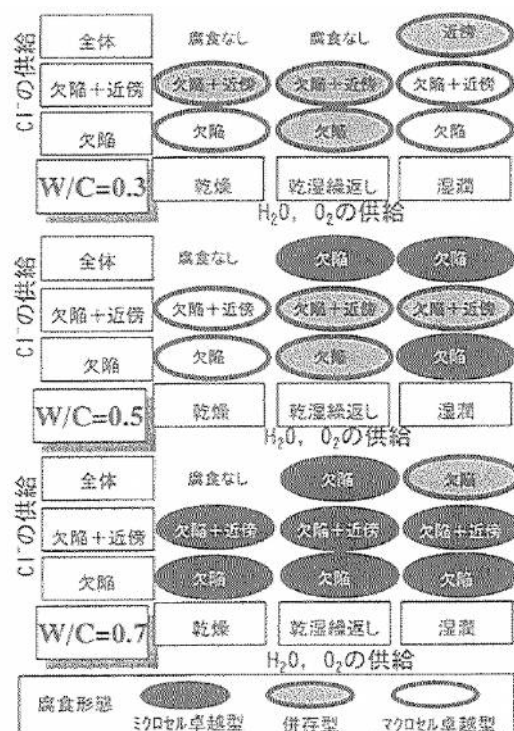


図2.2.5 塩害による腐食の形態¹²⁾

作製し、塩害による腐食形態について考察を行っている。図2.2.5に示すように、水/セメント比が小さい場合（W/C=0.3）はマクロセル卓越型が多く、逆に水/セメント比が大きい場合（W/C=0.7）はミクロセル卓越型が多くなることを明らかにしており、条件によっては必ずしもマクロセル腐食が卓越するわけではないことを示している。

2.3 コンクリート構造物の塩害に対するコンクリート混和材の効果

これまで、コンクリート材料による塩害対策としては、化学的耐久性に優れる高炉セメントを使用する方法が知られている。森ら¹⁷⁾は、各種セメントを用いて海水で練り混ぜたコンクリートで2cm、4cmおよび7cmのかぶりの鉄筋コンクリート供試体を作製し、海水循環水槽にて10年間養生した後の鉄筋の腐食面積率を計測している。その結果を筆者がグラフ化したものを図2.3.1に示す。これによれば、高炉セメントB種を用いたコンクリートは、普通セメントや早強セメントおよびアルミナセメントと比較して鉄筋腐食面積が最も小さい結果となっている。

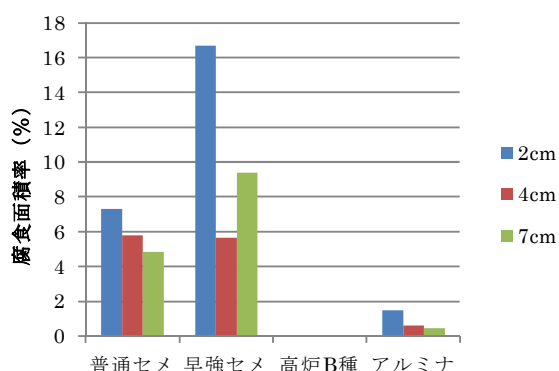


図 2.3.1 暴露 10 年での鉄筋の腐食面積率¹⁷⁾

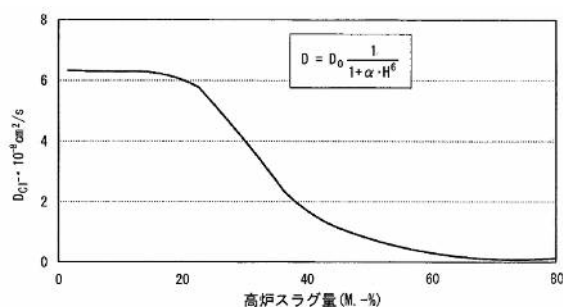


図 2.3.2 セメントペーストの拡散係数 D_{Cl} と高炉スラグ量の関係²⁰⁾

これは、高炉セメントをベースとするコンクリートは、ポルトランドセメントをベースとするコンクリートに比べて、完全に水和すると、より緻密な空隙構造となり、そのため高い拡散抵抗性を示すためとされている¹⁸⁾。さらに、高炉スラグ微粉末に12～15%含有される酸化アルミニウム (Al_2O_3) 成分が作用し、塩化物イオンを固定する生成物（フリーデル氏塩： $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ）が生成しやすくなるため、塩化物イオンの浸透を大きく抑制する効果があることも指摘されている¹⁹⁾。拡散抵抗性は高炉セメント中の高炉スラグ量とも強い関係がある。図2.3.2に示すように、高炉セメント中の高炉スラグの混和率が高くなるほど塩化物イオンの拡散係数は大きく減少する²⁰⁾。

一方、大賀ら²¹⁾は、高炉セメントの効果を発揮するには、材齢初期の養生を十分に行わなければならないと、養生が不十分であると効果が十分に得られないばかりか、ひび割れの発生などにより、逆に塩化物イオンの拡散を助長してしまう課題を指摘している。

また川村ら²²⁾は、図2.3.3に示すように防錆剤の一種である亜硝酸塩をコンクリートに混和することにより、塩化物イオン量がセメントに対して0.5%の混和率までは十分に鉄筋を防食できる効果があることを示している。

他にも、佐々木ら²³⁾は亜硝酸型ハイドロカルマイトを用いた塩素吸着剤を用いた断面修復材について検討している。図 2.3.4 に示すように断面修復部だけにとどまらず、躯体コンクリート側にも亜硝酸イオンが浸透し、補修材と躯体の界面から 10mm 程度躯体コンクリート内部においても塩化物イオンとのモル比 ($\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$) が 1.0 以上あり、躯体内部 10mm 程度においても防食効果があることを示している。

亜硝酸塩は、アノード型腐食抑制剤と呼ばれる防錆剤の一種で、亜硝酸イオン (NO_2^-) と第一鉄イオン (Fe^{2+}) とが反応し、アノード部からの Fe^{2+} イオンの移動が阻害され、 Fe_2O_3 として鉄表面に沈着し、不動態被膜を形成するとされている²⁴⁾。しかし、それ自体が塩化物イオンの浸透を抑制する機能を持ったものではなく、塩化物イオンの浸透を抑制することはできない。さらに高谷ら²⁵⁾は鉄筋コンクリート中の亜硝酸イオンに濃度勾配が生じた場合、鉄筋にマクロセル腐食が生じる可能性があることも指摘しており、使用には注意が必要である。

また、同じように亜硝酸イオンにより防錆性能を発揮する混和材である亜硝酸型ハイドロカルマイトは層状の化合物で、図 2.3.5 のように層間に存在する亜硝酸イオンが塩化物イオンと交換される²⁶⁾。これにより、液相中の塩化物イオンを結晶内に固定化し、防錆効果をもつ亜硝酸イオンをコンクリート中に放出する。しかし、亜硝酸型ハイドロカルマイトは水和物であるため嵩高く、断面修復材などのモルタルやコンクリートに混和すると流動性に悪影響を与える場合がある。

他方、塩害の原因となるコンクリート中の塩化物イオンには鉄筋の腐食を引き起こす液相中の塩化物イオン（以下、可溶性塩化物イオンと称する）と鉄筋の腐食には直接関わらないセメント水和生成物等に固定および吸着した塩化物イオン（以下、固定化塩化物イオンと称する）とがある。既往の研究ではこの固定化塩化物イオンはセメント水和物中では、セメント質量の 0.4% 程度までセメントペースト中に固定化することが示されている²⁷⁾。

固定化塩化物イオンは、フリーデル氏塩などとして水和生成物と化学的に結合している固相塩化物イオンと、C-S-H などの水和生成物に物理的に吸着している吸着塩化物イオンとにさらに分けられる²⁸⁾。佐々木ら²⁹⁾は、固

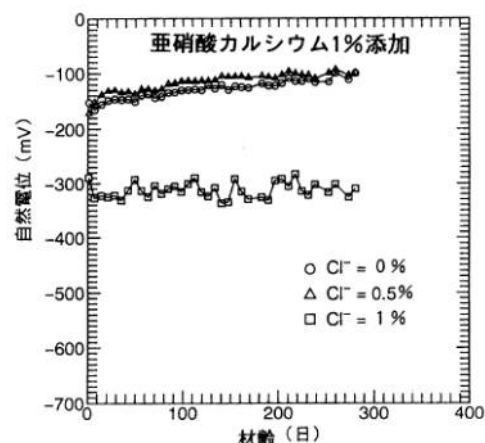


図 2.3.3 亜硝酸カルシウムを混和したコンクリート中の鉄筋の自然電位の変化²²⁾

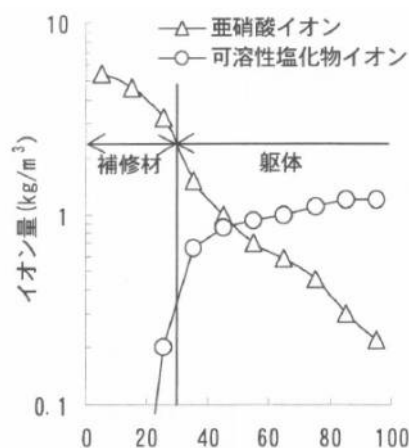


図 2.3.4 可溶性塩化物イオンと亜硝酸イオンの深さ方向分布²³⁾

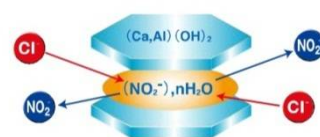


図 2.3.5 亜硝酸型ハイドロカルマイトの塩化物イオン交換反応²⁶⁾

定化塩化物イオンを固相塩化物イオンと吸着塩化物イオンとに分離した場合、吸着塩化物イオンの割合が 80%～90%程度となり、かなり割合が大きいことを指摘している。これは、C-S-H 生成量がモノサルフェート生成量に比べて著しく大きいことによると考えられるとしている。

盛岡ら³⁰⁾は、図 2.3.6 に示すように、ポルトランドセメント中にカルシウムアルミネート鉱物の一種である $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (以下、 CA_2 と略記) を混和することにより、固定化塩化物イオン量が増え、可溶性塩化物イオンが減少することを見出し、塩害対策に有効な混和材となりえることを示した。さらに、式[1]および式[2]によって $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ で示されるハイドロカルマイト (以下、HC と略記) が多量に生成し、それが可溶性塩化物イオンを固定化する能力に優れていることを報告している。つまり、 CA_2 をポルトランドセメントに混和することにより生成する HC が、可溶性塩化物イオンをフリーデル氏塩 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) として結晶構造内に固定化し、鋼材腐食の原因となる可溶性塩化物イオンを減少させる。

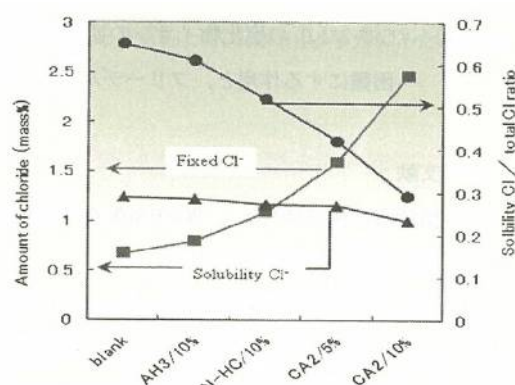


図 2.3.6 CA_2 を混和したセメントペースト中の固定化塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量³⁰⁾



また田原ら³¹⁾は、図 2.3.7 に示すように、疑似海水中に浸せきさせた CA_2 を混和したセメントモルタルが、普通セメントモルタルや高炉セメントモルタルに比べて塩化物イオンの浸透抑制性能にも優れていることを示した。供試体を疑似海水中に浸せきした際、普通セメントモルタルでは、硬化体中の水酸化カルシウムと塩化物イオンが反応して、塩化カルシウムとなる。塩化カルシウムは水への溶解度が非常に高く (74.5g/100mL H_2O)、硬化体中のカルシウムが溶液中へ溶脱し、硬化体組織が多孔化していく。

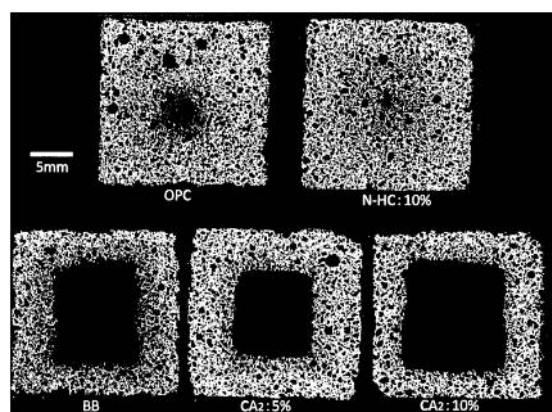


図 2.3.7 疑似海水中に浸せきした各種セメントモルタルの EPMA 測定 (元素 Cl) 結果³¹⁾

一方、 CA_2 を混和すると、式[1]で示したように CA_2 は水酸化カルシウムと反応して HC を生成するので、硬化体中の水酸化カルシウム量が普通セメントモルタルに比べて少なくなる。さらに HC が可溶性塩化物イオンと反応してフリーデル氏塩となり、可溶性塩化物イオンを結晶内に固定化するため、カルシウムの溶脱と硬化体組織の多孔化を引き起こす塩化カルシウムの生成が著しく減少するためであると考察している。

また、 CA_2 を混和したセメントペーストに $180^{\circ}C$ 10 気圧の条件でオートクレーブ養生を行った場合、 CA_2 から生成される HC が消失し、塩化物イオン固定化能力がなくなってしまうことも示されている³²⁾。

さらに庄司ら³³⁾ は、 CA_2 を混和したセメントモルタルに蒸気養生を実施し、蒸気養生の温度条件が CA_2 の塩化物イオン浸透抑制効果に与える影響を検討している。図 2.3.8 に示すように、蒸気養生の温度条件で $70^{\circ}C$ を境に CA_2 を混和したモルタルは普通セメントモルタルと比較して圧縮強度が大きく低下する。また、図 2.3.9 に示すように、蒸気養生温度条件が $70^{\circ}C$ 以上では CA_2 を混和したモルタルは普通モルタルより塩化物イオン浸透深さが大きくなる。これは、 HC は高温を受けると分解するため、セメント硬化体組織がポーラスになったためとしている。これにより、 CA_2 を混和したセメント硬化体に蒸気養生を行う場合には養生温度条件があることを示している。

また、福留ら³⁴⁾ は、 CA_2 を混和した鉄筋コンクリート供試体を作製し、海岸の干満帯に暴露試験を行っている。表 2.3.1 に試験を実施したコンクリート配合を、図 2.3.10 に暴露した鉄筋コンクリート供試体の概要を示す。

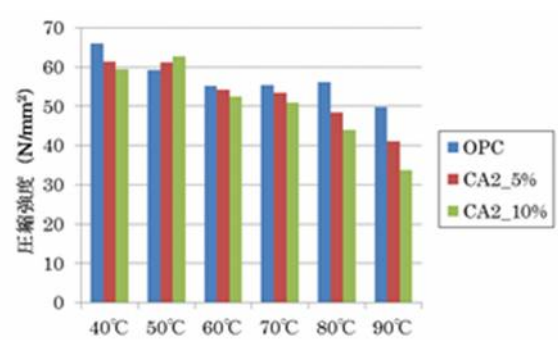


図 2.3.8 CA_2 を混和したセメントモルタル供試体の蒸気養生温度条件と圧縮強度³³⁾

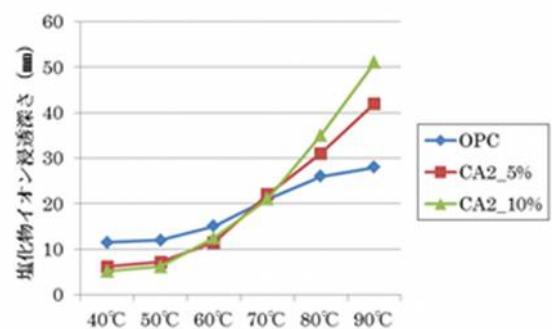


図 2.3.9 CA_2 を混和したセメントモルタル供試体の蒸気養生温度条件と塩化物イオン浸透深さ³³⁾

表 2.3.1 コンクリート配合

Sample	W/B (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m³)							(B × wt%)		Slump (cm)	Air (%)
			W	C	CA_2	GGBS	FA	S	G	AE1	AE2		
OPC	50	42.5	185	370	-	-	-	721	991	0.30	0.006	7.5	4.3
CA2-5 %				352	19	-	-	721	990	0.35	0.006	9.0	4.8
CA2-7 %				344	26	-	-	720	990	0.40	0.006	7.5	5.0
CA2-9 %				337	33	-	-	720	989	0.45	0.006	7.0	5.5
BB				185	-	185	-	715	979	0.20	0.006	9.0	4.0
FA				296	-	-	74	711	990	0.25	0.010	9.0	3.0

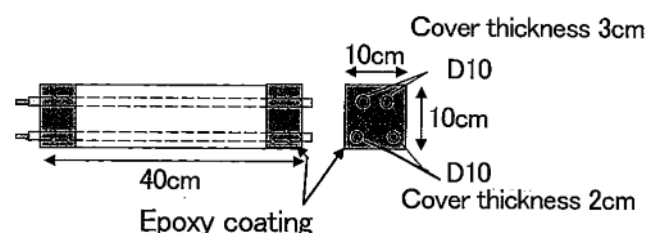


図 2.3.10 暴露した鉄筋コンクリート供試体

図 2. 3. 11 に表 2. 3. 1 に示した各種コンクリートを用いた鉄筋コンクリート供試体のうち鉄筋かぶり厚が 2cm の条件のものを 1 年間干満帯に暴露した際の、鉄筋の自然電位の変化を測定した結果を示す。これより、普通セメントを用いたコンクリートは、180 日程度で ASTM³⁵⁾ で規定される腐食判定値である -350mV vs CSE 以下となるが、CA₂ を混和したものは、混和率により異なるが、腐食判定値よりも 300 日以上貴側の値を保持している。また、図 2. 3. 12 から暴露 1 年後の鉄筋コンクリート供試体から取り出した鉄筋面積率は、CA₂ を混和したコンクリートは普通コンクリートに比べて大幅に小さい結果となっている。以上のことから、CA₂ を混和したコンクリートは、普通コンクリートに比べて鉄筋の腐食開始までの期間を延長させ、鉄筋腐食を抑制する効果があることが示されている。

したがって、躯体コンクリートに CA₂ を混和したコンクリートを用いることは、塩害を受けることが予想される新設構造物もしくはコンクリート二次製品の耐久性を向上させる予防保全の手段として適用が可能と考えられる。一方、断面修復材に CA₂ を混和することは、塩害を受けるコンクリート構造物の補修対策として、断面修復工法を選択する場合、耐久性を向上させる手段として有効と考えられる。

なお、式〔1〕および式〔2〕から、CA₂ が完全に反応する場合、CA₂ 1000g あたり約 546g の塩化物イオンを固定化する能力があることになる。しかし、実際のセメント・コンクリート中では、CA₂ は完全には反応せず、一部は未反応で残存すると考えられるので、実際のセメント・コンクリート中での CA₂ の塩化物イオンの固定化能力としてはこれ以下となると考えられる。

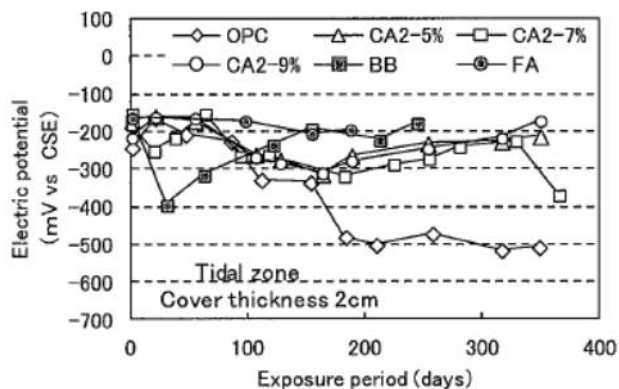


図 2. 3. 11 干満帯に暴露した鉄筋コンクリート供試体の鉄筋の自然電位の変化³⁴⁾

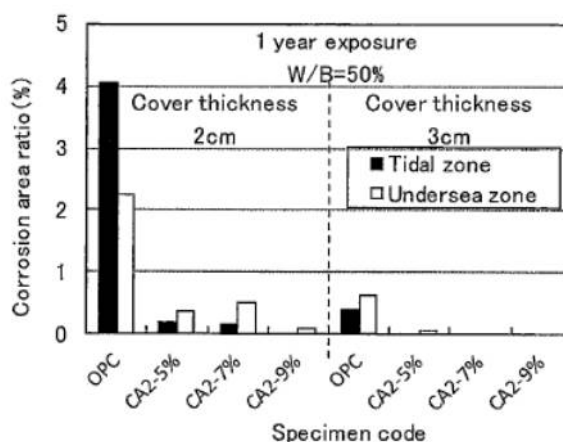


図 2. 3. 12 干満帯に暴露した鉄筋コンクリート供試体の暴露 1 年後の鉄筋腐食率³⁴⁾

2.4 コンクリート構造物の電気化学的防食工法

2.4.1 コンクリート構造物の電気化学的防食工法の原理

コンクリート構造物の電気化学的防食工法の基本原理は、腐食環境下で金属が保持している電位を外部電流によって強制的に変化させ、腐食の生じない電位(通常、防食電位と呼ばれる)まで移行させるものである。

コンクリート中の鋼材に対しては、通常、活性化している状況から不活性となるまでマイナス方向(卑な方向)へ電位を移行させて防食を図るカソード防食法が用いられる。その原理³⁶⁾を図2.4.1に示す。

図中の(a)は腐食反応、すなわちアノード部とカソード部との間に生じた電位差により腐食電流が流れている状態である。電気防食工法によりコンクリート表面に設置した陽極システムから鋼材へ電流を流すと、図中の(b)のように電流は貴な電位を示すカソード部へ優先的に流れる。これに伴い、カソード部の電位はマイナス方向に変化し、アノード部とカソード部の電位差は小さくなる。しかし、この状態では腐食電流は完全には停止していないため、防食としては不十分である。防食電流を大きくすると図中の(c)のようにアノード部とカソード部の電位差はなくなり、腐食電流は流れなくなる。すなわち、鋼材の腐食反応は停止する。これが電気防食工法の原理である。

図2.4.2は、コンクリート中の鋼材の酸化反応と電位の関係を示すアノード分極曲線の一例である³⁷⁾。前述の電気防食の基本概念は、この図中のA点よりも鋼材の電位を卑とすることによって腐食を停止させることを意味する。しかし、高アルカリ性によって不動態化している鋼材に、塩分の影響によって腐食が生じるコンクリート中では、カソード防食の考え方が上記とは若干異なる。

この場合の鋼材の腐食は、不動態領域から急激に腐食電流量が増大する孔食の発生(B点)に端を発する。したがって、孔食が起こらない

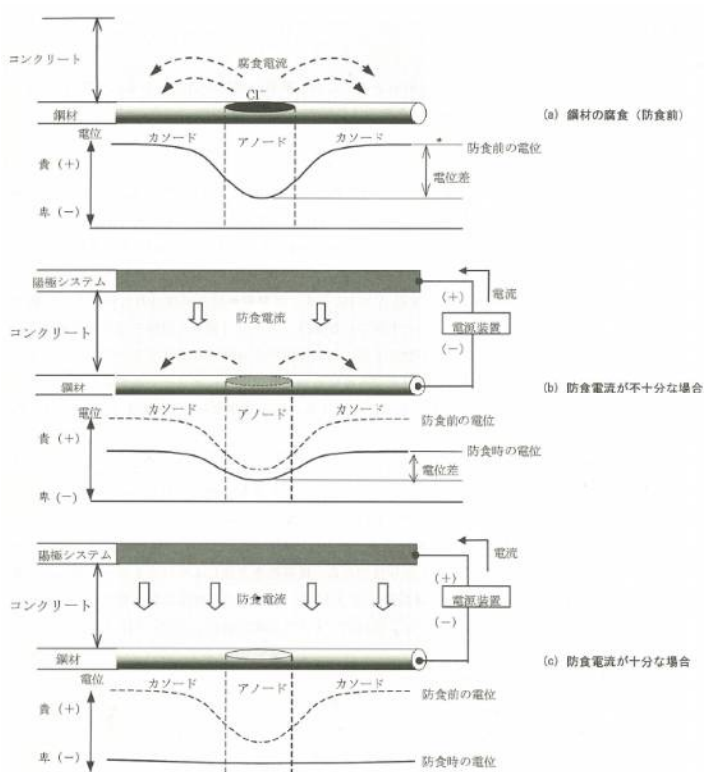


図 2.4.1 電気防食の原理³⁶⁾

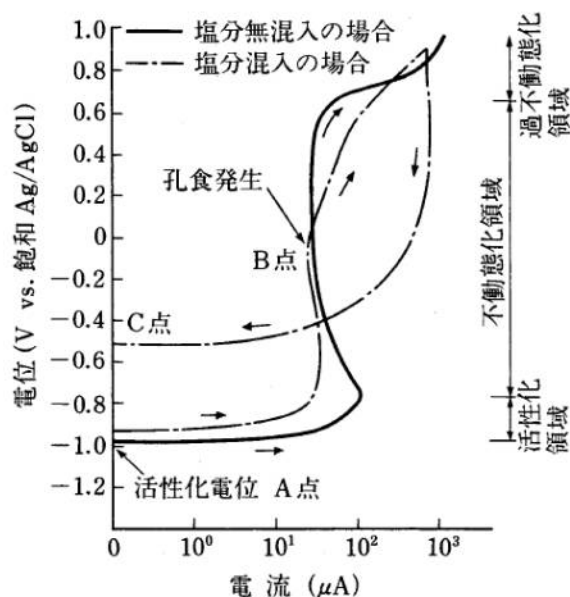


図 2.4.2 コンクリート中の鋼材のアノード分極曲線³⁷⁾

電位まで鋼材電位を下げれば、A点まで電位を下げなくても防食できることになる。ただし、いったん孔食が発生した鋼材では、その後に電位をB点より下げても、鋼材はすぐには元の不動態には戻らず、さらに卑側に分極させてC点の電位になって初めて孔食の進行は停止する。このC点の電位を孔食停止電位と呼ぶ。

2.4.2 コンクリート構造物の電気化学的防食工法の防食基準

電気防食基準に基づいた通電の設定が、最終的な防食効果を決定づけることになる。その場合、理論的には孔食停止電位がコンクリート中の鋼材の防食基準としてもっとも妥当であるが、実際には、①孔食停止電位自体も厳密な物理定数ではなく、測定条件等によって変化すること、②コンクリート中の鋼材の電位を長期間安定して測定できる方法が確立されていないこと、③通電量は陽極材の耐久性等も考慮して決定する必要があることなどのために、孔食停止電位が防食基準として必ずしも適当であるとはいえない。そこで、現在までに作成されたコンクリート構造物の電気防食工法の設計施工指針等においては、100mV復極量基準が広く防食基準として採用されている³⁸⁾。

この基準では、電位の絶対値ではなく通電による電位変化量を基準として用いている。具体的には、「電気防食中に一時的に通電を停止させ、停止直後の鋼材電位と、その後安定した時点での電位との差が100mV以上(図2.4.3参照)」(復極基準)あるいは、「通電直後の鋼材電位とその後通電を継続して安定した時点での電位の差が100mV以上」(分極基準)である³⁹⁾。

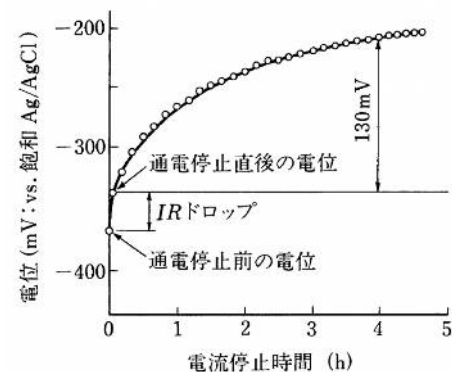


図 2.4.3 100mV 復極基準の概要³⁸⁾

これらの基準では、電位の絶対値を必要としないので参照電極の影響をそれほど受けないこと、基準を満足する電流量はそれほど小さくなく、したがって経済的で過防食の心配もほとんどないこと等の利点がある。なお、過防食とは電気防食において、電位を過大に卑にすることであり、単に電気エネルギーロス、外部電極設備等のオーバーロードによる短寿命化を誘起するだけでなく、コーティングの鋼に対する付着力の低下や水素脆化割れが誘起される可能性があると考えられている⁴⁰⁾。

また、これらの基準を用いて電気防食が施されたコンクリート中の鋼材においては、十分な防食効果が確保されていたとする試験結果も多い(例えば⁴¹⁾。

しかし一方で、この基準の理論的根拠が不明確であるために、防食効果の信頼性の点で問題が残されていることも事実である。例えば、コンクリート中の鋼材腐食の完全停止のためには、鋼材電位を前述の孔食停止電位(約-0.55 VvsAg/AgCl)より卑とする必要がある。これに対してコンクリート中で腐食している鋼材の自然電位は、通常、およそ-0.2~-0.5 VvsAg/AgCl である。したがって、単純に考えると、腐食停止の

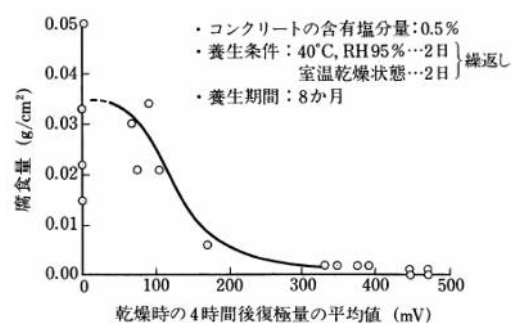


図 2.4.4 復極量と鋼材腐食の関係⁴²⁾

ためには50～350mV程度のシフトで良いはずである。

実際の防食効果の検討では、図2.4.4に例を示すように、電気防食による鋼材の電位変化量が100mVを超えると、防食効果は急激に高まる⁴²⁾。

山本ら⁴³⁾は、鉄筋コンクリート中の同一鉄筋内でマクロセル腐食を起こしている場合と、異なる鉄筋間でマクロセル腐食を起こしている場合について、電気防食工法の効果について検討を行っている。その結果、乾燥環境下の鉄筋はカソードに、湿潤環境下の鉄筋はアノードになり、鉄筋間のマクロセル電流は、アノード部の腐食を助長することを示し、これらのマクロセル腐食を起こしている状態でも復極量100mVの防食基準が適用できるとしている。

このような電位シフト量と防食効果の関係は、コンクリート中の塩分量や環境温度によっても異なるとの見解もあるが⁴⁴⁾、その手法自体は種々の点からきわめて汎用性が高いと考えられる。したがって、そのシフト値に関しては今後もより十分な検討が望まれている。

2.4.3 コンクリート構造物の電気化学的防食工法の種類

カソード防食法には、外部電源方式と流電陽極方式の2つの方式がある。図2.4.5に、これらの方式の概略図を示す⁴⁵⁾。

外部電源方式は、定電圧あるいは定電流の外部直流電源装置を用い、高耐久性陽極からコンクリートを介して鋼材に電流を供給する方式である。

流電陽極方式は、鋼材に対して卑な電位を有する陽極(亜鉛アルミニウム等)を、コンクリートを介して鋼材と電気的に接続し、両者の電位差による電池作用を利用して鋼材に防食電流を供給する方式である。

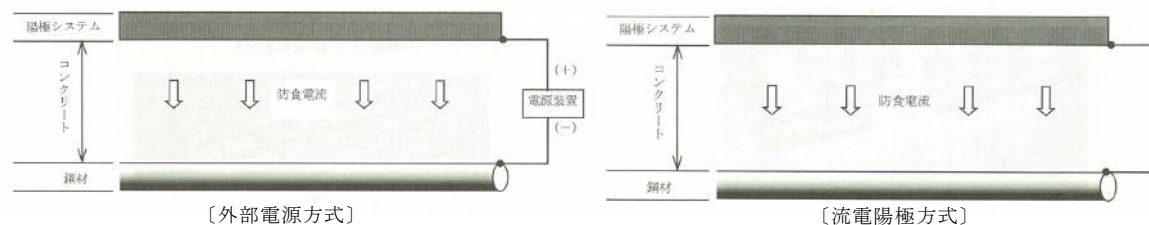


図 2.4.5 電気化学的防食工法の方式⁴⁵⁾

さらに陽極システムの形状により、次の3種類に区別することが可能である⁴⁵⁾。

①面状陽極方式

面状陽極方式とは、コンクリート表面あるいは内部に面状に陽極システムを設置して所定の電流を流すことにより鋼材を防食するものである。図2.4.6に概要を示す。

②線状陽極方式

線状陽極方式とは、コンクリート表面あるいは内部に線状の陽極システムを設置して所定の電流を流すことにより鋼材を防食するものである。図2.4.7に概要を

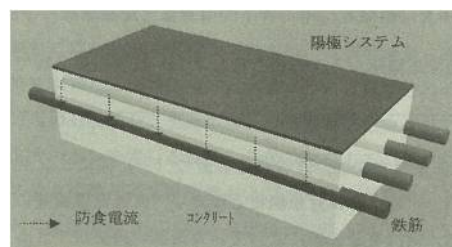


図 2.4.6 面状陽極方式概要図⁴⁵⁾

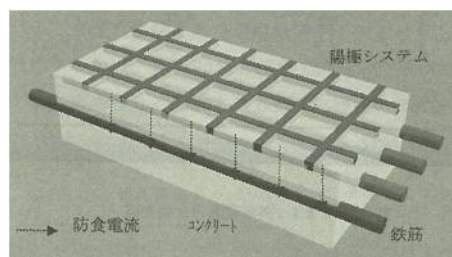


図 2.4.7 線状陽極方式概要図⁴⁵⁾

示す。

③点状陽極方式

点状陽極方式とは、コンクリート表面あるいは内部に点状の陽極システムを設置して所定の電流を流すことにより鋼材を防食するものである。図 2.4.8 に概要を示す。

これらのコンクリート構造物の電気防食工法は、わが国においては 10 万 m^2 を超える施工実績があり⁴⁶⁾、塩害が懸念されるコンクリート構造物の耐久性を確保する対策の一つとして、広く認知されている。

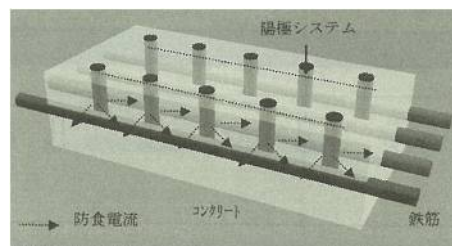


図 2.4.8 点状陽極方式概要図⁴⁵⁾

2.4.4 犠牲陽極材を用いた鉄筋コンクリート構造物の電気化学的防食工法

断面修復工法において、2.2節で説明したマクロセル腐食が懸念される場合、断面修復部に犠牲陽極材を埋設する対策が行われることがある⁴⁷⁾。犠牲陽極材は90年代末に図2.4.9に示すような亜鉛の犠牲陽極材が開発された⁴⁸⁾。亜鉛を被覆しているモルタルは水酸化リチウム ($\text{pH}>14.5$) で飽和されている。それによって亜鉛酸化物が溶解型の生成物となり、亜鉛は活性状態を維持することが可能となる。犠牲陽極材は、電気化学的防食工法の一つであるが、電流量の調整や外部電源のメンテナンスは不要であり、設置後の維持管理の負担が少なく、塩害を受けるコンクリート構造物の断面修復工法と併用することで耐久性の向上が図れるものと考えられる。

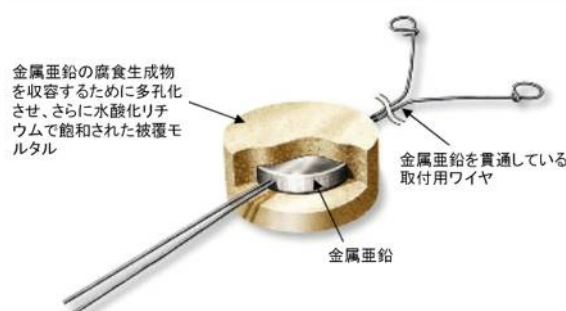


図 2.4.9 犠牲陽極材概要図

Sergi⁴⁹⁾ はこの犠牲陽極材を用いて、イギリスの橋梁で 10 年間設置した結果を報告している。

図 2.4.10 に橋梁に設置した 12 個の犠牲陽極材から供給される電流の測定結果を示す。同じ犠牲陽極材でも電流値が上下するのは、季節変動による外気温の変化によるところが大きい。鉄筋の腐食レベルに応じて供給される電流も自動的に変化するように、鉄筋の腐食が激しいときはより高い電流が供給される。

また、表 2.4.1 に図 2.4.10 の電流値から求められる各々の犠牲陽極材の 10 年間の総電流出力（電荷）を示す。

図 2.4.11 にファラデーの電気分解の第 1 法則より求まる犠牲陽極材 1 個あたりの亜鉛 60g が持つ総電荷から、電流出力効率を 85% と仮定した場合の、10 年後における亜鉛の電荷消費量を示す。以下に計算過程を示す。

ファラデーの電気分解の第一法則は式 (2.4.1) で示される。

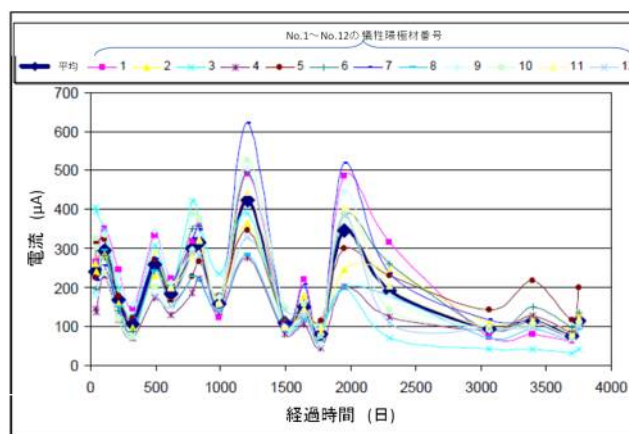


図 2.4.10 橋梁に設置した 12 個の犠牲陽極材から供給される電流の経時変化と平均値

$$Q = n \times m_{Zn} \times F / A_{Zn} \quad \text{式 (2.4.1)}$$

但し、 Q ：総電荷量（C（クーロン））， n ：亜鉛の電価数（ $n=2$ ）

m_{Zn} ：亜鉛塊質量（g）， F ：ファラデー定数（C/mol）

A_{Zn} ：亜鉛の原子量（g/mol）

式 (2.4.1) より、犠牲陽極材 1 個あたりの総電荷量 Q_1 は、ファラデー定数を 96,485C/mol とすると、

$$Q_1 = 2 \times 60 \times 96,485 / 65.4 \div 177,000 \text{ (C)}$$

電流出力効率は 85%と仮定しているので、犠牲陽極材 1 個が電流として出力できる電荷は、 $177,000 \times 0.85 = 150,450 \text{ (C)}$ となる。

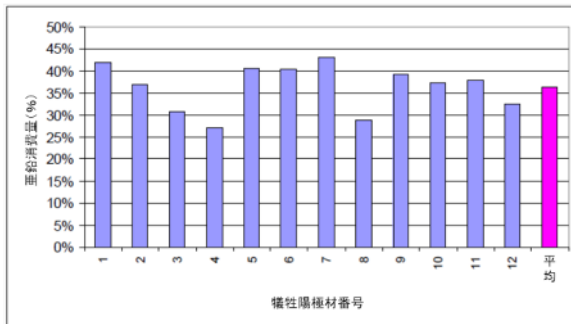


図 2.4.11 犠牲陽極材の 10 年間にける亜鉛金属の消費率

表 2.4.1 から例えば、犠牲陽極材 No.1 は試験開始から 10 年間に 63,141C の電荷を出力しているので、亜鉛金属の消費率は $63141 / 15045 \div 0.42$ ，つまり 42%となる。したがって、犠牲陽極材 No.1 は 10 年で亜鉛金属の 42%を消費したので、寿命は約 24 年となる。これらの結果から、この研究で設置した犠牲陽極材は 24～37 年の間、電流を流し続ける能力を持っていることが示されている。写真 2.4.1 に示す⁴⁹⁾ ように、10 年後における犠牲陽極材中の亜鉛金属の表面には、酸化亜鉛と考えられる腐食生成物で覆われており、電流を流し続けると最終的には酸化亜鉛の被膜に覆われ、電流が流れなくなるものと考えられる。

松久保ら⁵⁰⁾ は、分割鉄筋を用いた鉄筋コンクリート供試体を海水シャワーが 6 時間間隔で散水され、乾湿が繰り返される海洋環境下を模擬した条件で 2 年 8 か月間暴露した結果を報告している。供試体概要を図 2.4.12 に、暴露 2 年 8 か月後の復極

表 2.4.1 各犠牲陽極材の 10 年間の総消費電荷

犠牲陽極材番号	消費電荷 (C)	犠牲陽極材番号	消費電荷 (C)
1	63141	7	65194
2	55696	8	43619
3	46621	9	59459
4	41135	10	56333
5	61228	11	57205
6	60825	12	48989
		平均	54954



写真 2.4.1 供用 10 年後における犠牲陽極材中の金属亜鉛

量を図 2.4.13 に示す。

図 2.4.12 より，暴露 2 年 8 か月後において，未補修部の塩化物イオン濃度が 6kg/m^3 含まれている供試体の一部で復極量が 100mV 未満となったが，その他においては 100mV 以上の復極量を示しており，犠牲陽極材の腐食抑制効果が持続していることを示している。

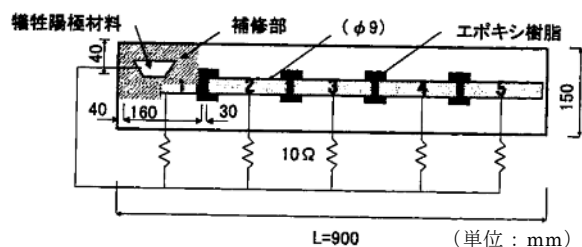


図 2.4.12 供試体概要図

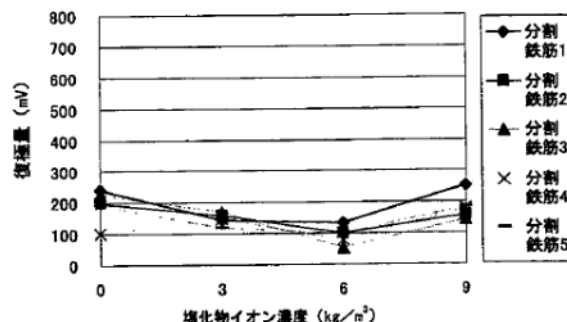


図 2.4.13 暴露 2 年 8 か月後の復極量

2.4.5 流電陽極方式の電気化学的防食工法の数値解析

流電陽極方式の電気化学的防食工法の数値解析の研究事例はあまり多くはないが，米谷ら⁵¹⁾の研究を紹介する。

解析対象として，海上に建設されたジャケット構造物を選定し，解析領域は構造物周辺の海水および海底土で満たされた図 2.4.14 の破線内で示される領域である．構造物形状情報，海中・土中の電気伝導度，そしてカソードの分極曲線を線形近似したデータを用いて，境界要素法により構造物の表面電位の計算を行う。

領域の境界は，犠牲陽極表面の犠牲陽極表面のアノードとなる境界 Γ_a ，骨組の鋼材でカソードとなる境界 Γ_{c1} ，水面付近の耐海水性ステンレス鋼でカソードとなる Γ_{c2} ，そして海水を仮想的に分割した解析領域の境界 Γ_n は周囲からの電流の流れ込みがないものとして扱う．また，領域内の電位を ϕ ，電気伝導度を κ とし，境界 Γ_a ， Γ_{c1} ， Γ_{c2} ， Γ_n 上の ϕ の値を ϕ_a ， ϕ_{c1} ， ϕ_{c2} ， ϕ_n とする．またそれぞれの境界における法線方向の電流密度を i_a ， i_{c1} ， i_{c2} ， i_n とする．領域においてイオンの損失や増加が生じないとして，海中と土中の電気伝導度が不均一であることを考慮すると，領域内の電位は支配方程式として，ラプラスの式 (2.4.2) を満足する。

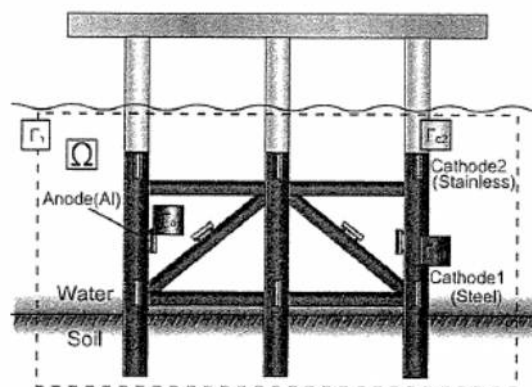


図 2.4.14 海上ジャケットの解析モデル

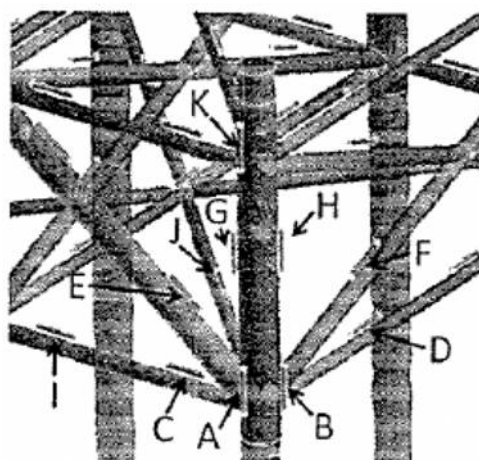


図 2.4.15 消耗する犠牲陽極材の候補

$$\nabla \cdot (\kappa \nabla \phi) = 0 \quad \text{式 (2.4.2)}$$

ここで、境界条件をそれぞれ次式で与える．

$$\left. \begin{aligned} i_a &= i_{a1} \quad (\text{on } \Gamma_a) \\ \phi_{c1} &= -R_{c1} i_{c1} + \phi_{c10} \quad (\text{on } \Gamma_{c1}) \\ \phi_{c2} &= -R_{c2} i_{c2} + \phi_{c20} \quad (\text{on } \Gamma_{c2}) \\ i_n &= \kappa \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (\text{on } \Gamma_n) \end{aligned} \right\} \quad \text{式 (2.4.3)}$$

i_{a1} は Γ_a 上における電流密度である．犠牲陽極はその接水抵抗と自然電位により電流量が決まるが、米谷らの検討では通電初期を想定して、すべての犠牲陽極から同じ量の電流が発生すると仮定した．そのため、電流量を犠牲陽極の表面積で除した電流密度を犠牲陽極の境界条件として与えた． R_{c1} 、 R_{c2} はそれぞれ境界 Γ_{c1} 、 Γ_{c2} における分極抵抗、 i_{c1} 、 i_{c2} は電流密度、また、 ϕ_{c10} 、 ϕ_{c20} は線形近似の際の定数項である． $\partial/\partial n$ は外向き法線方向微分を表す．

式 (2.4.3) の条件のもと、式 (2.4.2) を数値解析で解くことで、構造物表面の接点における電位を計算する．防食設計上、最も危険側である犠牲陽極が 3 個同時に消耗するという条件を設定し、構造物表面電位が最も貴化する部位の推定を行った．

その結果、図 2.4.15 の A、B、C 点の犠牲陽極材が消耗するパターンが最も貴化するパターンとなり、電気防食上危険であるという計算結果となった．この場合、四隅下側が防食上危険になりやすく、通電初期についてはこの周辺を重点的に検査間隔の設定をするのが良いと考えられる解析結果となった．このことから、流電陽極方式の電気防食工法においても、境界要素法を用いた数値解析によって、おおむね現実に近い解を得ることができるものと考えられる．

2.5 本研究で取り上げる課題

本研究では、3 章および 4 章にて、以下のように課題を設定し検討を行う．

3 章では、塩害を受けるコンクリート構造物の断面修復工法の高耐久化を検討課題とし、 CA_2 を主成分とした塩素固定化材を混和した断面修復材および断面修復工法について検討を行う．具体的には塩素固定化材を混和した断面修復材の基礎物性および断面修復材と塩化物イオンを混和したコンクリートと打ち継いだ際の打継界面付近の鉄筋腐食および塩化物イオン拡散挙動について検討を行う．

さらに、塩素固定化材の塩化物イオンの固定化挙動をモデル化し、塩化物イオンの拡散挙動について数値シミュレーションを用いて解析的に検討を行い、塩素固定化材を用いた断面修復材を用いた断面修復工法の供用可能期間及びライフサイクルコストについても検討する．

4 章では、塩害を受けるコンクリート構造物の断面修復工法と併用する犠牲陽極材を埋め込む犠牲陽極工法に着目し、その鉄筋防食性能の評価を検討課題とした．具体的には、コンクリート構造物の断面修復工法を模擬した供試体を用い、暴露温度、コンクリート躯体中の塩化物イオン量、コンクリート強度を種々に変えた条件で試験を実施し、これらの条件が犠牲陽極材の鉄筋防食性能にどのような影響を与えるかについての検討を行う．さらに、犠牲陽極材の設置位置を断

面修復材内部に設置する方法と、躯体コンクリート表面の外部に設置する方法についても試験を実施し、犠牲陽極材の設置位置が鉄筋防食性能に与える影響について検討する。

加えて、鉄筋腐食率と電気化学的測定値との関係から、犠牲陽極材を用いた防食工法の防食基準についても検討を行う。

さらに、犠牲陽極材を用いた供試体について、数値シミュレーションによる電位および電流の推定を行い、犠牲陽極材の設置位置や犠牲陽極材が消耗した際の鉄筋防食性能について解析的検討を行う。

これらの検討を通じて、塩害を受けるコンクリート構造物の断面修復工法について、従来の断面修復工法よりも効果的で経済的な断面修復工法の提案を行うことを本研究の目的とする。

【参考文献】

- 1) 玉越隆史，窪田光作，星野誠，横井芳樹：コンクリート橋の塩害対策資料集（第 3 回塩害調査）—実態調査（近接目視）に基づくコンクリート橋の塩害対策の検討—，国土技術総合研究所資料，第 711 号，2012
- 2) 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化に関する研究委員会報告，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.1，pp.29-38，1999
- 3) 土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，p.161，2013
- 4) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'14，p.41，2014
- 5) 西林新蔵，小柳洽，渡邊史夫，宮川豊章編集：コンクリート工学ハンドブック，p.196，朝倉書店，2009
- 6) 高谷哲，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.2，pp.154-165，2013
- 7) 田村英雄，松田好晴：現代電気化学，pp.195-202，培風館，1980
- 8) 前田聡，戸高規行，山口明伸，武若耕司：塩害劣化モデル用パラメータとしてのコンクリート比抵抗の特性，土木学会第 59 回年次学術講演会，V-113，pp.223-224，2004
- 9) 土木学会：表面保護工法設計施工指針（案）および工種別マニュアル，2005
- 10) 宮口克一：コンクリート劣化診断と補修技術（その 1）ポリマーセメントモルタルによる断面修復工法，工業用水，No.592，pp.25-32，2009
- 11) 大濱嘉彦：コンクリート混和材の開発技術，pp.240-262，シーエムシー，1995
- 12) M.U.K.Afridi, et.al : Development of polymer films by the coalescence of polymer particles in powdered and aqueous polymer-modified mortars, Cement and Concrete Research 33, pp.1715-1721, 2003
- 13) 坂井悦郎，小菅啓一，真下昌章，杉田淳：ポリマーセメントの微細組織と複合化機構，セメント・コンクリート論文集，Vol.47，pp.70-75，1993
- 14) 土木研究所編：塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋のマクロセル腐食形成機構，土木研究所資料，No.4131，2009
- 15) 飯島亨，工藤輝大，玉井譲：コンクリート構造物の部分断面補修箇所周辺における鉄筋腐食機構と劣化対策，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム，第10巻，

pp.311-316, 2010

- 16) 宮里心一, 大即信明, 木村勇人, 水流徹: モルタルの欠陥部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度, 土木学会論文集, No.690, V-53, pp.83-93, 2001
- 17) 森好生, 大即信明, 下沢治: 海洋環境における海水練りコンクリートの 10 年試験, セメント技術年報, 35, pp.341-344, 1980
- 18) 檀康弘, 近田孝夫, 永浜一孝: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生特性, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.222-227, 1991
- 19) 大即信明, 中下兼次, 長瀧重義: 塩分環境下におけるセメント硬化体中の鋼材腐食に及ぼす混和材の影響, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.538-543, 1991
- 20) J.Stark, B.Wicht: コンクリートの耐久性 (第 2 版), pp.71-72, セメント協会, 2003
- 21) 大賀宏行, 平間貴司, 國分勝郎: 塩化物透過性に及ぼす高炉スラグ微粉末混和の影響, 土木学会第 50 回年次学術講演会概要集, V-122, pp.244-245, 1995
- 22) 川村満紀, 谷川伸, 古東秀文: モルタルの細孔溶液の組成からみた亜硝酸塩の鉄筋防錆効果, コンクリート工学論文集, Vol.8, No.1, pp.75-84, 1997
- 23) 佐々木孝彦, 飯島亨, 立松英信, 大城武: 塩分吸着剤を用いて補修した供試体の鉄筋腐食性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.379-384, 2001
- 24) 笠井芳夫, 坂井悦郎編著: 新セメント・コンクリート用混和材料, pp.261-266, 技術書院, 2007
- 25) 高谷哲, 内藤智大, 須藤祐司, 山本貴士, 宮川豊章: 亜硝酸イオン濃度勾配がマクロセル腐食に与える影響に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, 第 12 巻, pp.483-488, 2012
- 26) 上田洋, 水野清, 上原元樹, 飯島亨, 玉井譲: 塩化物イオン吸着材を用いた鉄筋コンクリート構造物塩害抑制工法の耐久性評価, 鉄道総研報告, Vol.26, No.12, pp.11-16, 2012
- 27) J.Stark, B.Wicht: コンクリートの耐久性 (第 2 版), pp.74-75, セメント協会, 2003
- 28) 平尾宙: セメントによる塩化物イオンの固定に関する研究, コンクリート工学, Vol.42, No.11, pp.55-61, 2004
- 29) 佐々木謙二, 佐伯竜彦: 混和材を用いたセメント硬化体における塩化物イオン固定性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.691-696, 2005
- 30) 盛岡実, 田原和人, 山本賢司, 荒木昭俊: $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ の塩化物イオンの拡散抑制効果とその機構, 土木学会コンクリート技術シリーズ No.89, 混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会 (333 委員会) 報告書, No.2, pp.443-448, 2010
- 31) 田原和人, 山本賢司, 芦田公伸, 盛岡実: $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ を混和したセメント硬化体の塩化物イオン固定化挙動, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.428-434, 2010
- 32) 田原和人, 宮口克一, 盛岡実, 福留祐一, 山口明伸, 武若耕治: 促進養生を施したを混和したセメント硬化体の基礎物性及び塩化物イオン固定化能力, コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会 (338 委員会) 成果報告書 (その 2) およびシンポジウム論文集, p.347-354, 2012
- 33) 庄司慎, 宮口克一, 福留祐一, 山口明伸, 武若耕治: 蒸気養生の温度条件が $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$

- を混和したセメント硬化体の塩化物イオン固定化能力に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, 第13巻, pp.63-70, 2012
- 34) 福留祐一, 武若耕司, 山口明伸, 前菌裕也: $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 微粉末を混合したコンクリートの耐久性に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.66, pp.472-478, 2012
- 35) ASTM C876 「Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete」, ASTM International, 2009
- 36) 土木学会: 電気化学的防食工法 設計施工指針 (案), pp.53-54, 土木学会, 2000
- 37) 武若耕司, 峰松敏和: 鉄筋の電気防食に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.511-516, 1988
- 38) 土木学会: 電気化学的防食工法 設計施工指針 (案), pp.67-69, 土木学会, 2000
- 39) NACE: Standard Recommended Practice Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures, NACE Standard PR 0290-90, 1990
- 40) 梶山文夫: 電気防食における国内外の基準, 材料と環境, Vol.49, pp.515-519, 2000
- 41) 井川一弘, 山本悟, 坂本浩行: コンクリート中の鉄筋の電気防食に関する試験, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.272-273, 1988
- 42) 武若耕司, 馬庭秀士: コンクリート構造物の塩害対策における電気防食の適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.573-578, 1991
- 43) 山本悟, 上野萌, 石井浩司, 関博: マクロセルを形成したコンクリート中鉄筋の電気防食効果に関する実験的研究, 土木学会論文集E2, Vol.68, No.1, pp.9-25, 2012
- 44) M. Funahashi and J.B. Bushman: Technical Review of 100mV Polarization Shift Criterion for Reinforcing Steel in Concrete, Corrosion, Vol. 47, No. 5, pp.376-386, 1991
- 45) 土木学会: 電気化学的防食工法 設計施工指針 (案), pp.57-58, 土木学会, 2000
- 46) コンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会: 電気化学的防食工法の最新技術と施工事例, 2006
- 47) 小出剛, 原与司人, 藤原申次, 藤井大三: 電気化学的犠牲材料の基礎試験と実橋への適用, 土木学会学術講演会講演概要集VI, Vol.56, pp.376-377, 2001
- 48) G.Sergi, C.L.Page: Sacrificial anodes for cathodic protection of reinforcing steel around patch repairs applied to chloride-contaminated concrete, Eurocorr '99, European Corrosion Congress, Aachen, Germany 1999
- 49) G.Sergi, D.Whitmore: Performance of zinc sacrificial anodes for long-term control of reinforcement corrosion, NACE Corrosion2010 Conference & Expo, Paper No.10122, 2010
- 50) 松久保博敬, 真下昌章, 芦田公伸, 審良善和, 濱田秀則: 海洋環境下における犠牲陽極材料の腐食抑制効果, コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム, pp.357-362, 2004
- 51) 米谷直樹, 天谷賢治, 審良善和, 田代賢吉, 飯田知宏: 有限要素法を用いた海洋構造物における犠牲陽極消耗に対する防食限界の推定, 材料と環境, Vol.62, pp.11-15, 2013

第3章 カルシウムアルミネートを主成分とする塩素固定化材を用いた断面修復材

3.1 はじめに

塩害を受けるコンクリート構造物において断面修復工法を実施する場合、打継界面を貫通する鉄筋でマクロセル腐食が懸念される場合があり、マクロセル腐食はミクロセル腐食に比べて鉄筋腐食速度が速くなる可能性があることは、2章で述べた。したがって、塩害を受けるコンクリート構造物の断面修復工法において、長期の耐久性を求める場合は、鉄筋のマクロセル腐食に対する対策も必要となる。

一方、カルシウムアルミネートの一種である $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ （以下、 CA_2 と称す）を主成分とする塩素固定化材を普通セメントモルタルやコンクリートに混和すると、可溶性塩化物イオンを固定化する能力に優れるハイドロカルマイト（以下、 HC と称す）が多量に生成し、セメント硬化体中の可溶性塩化物イオン量を大きく抑制し、さらに、塩化物イオンの浸透抵抗性や鉄筋腐食に対する抵抗性も向上することが確認されている。そこで本章では、この CA_2 を主成分とする塩素固定化材を用いた断面修復材およびそれを用いた断面修復工法を検討の対象とした。

ここで、カルシウムアルミネートを主成分とする塩素固定化材から生成される HC は、図 3.1.1 に示すような層状複水酸化物の構造を持っている。塩化物イオンは、層間に存在する水酸化物イオンとイオン交換反応することで、結晶内に固定化される。 HC の粉末 X 線回折の測定結果から推定されるこの層間距離はおおよそ $1 \times 10^{-9} \text{m}$ である。ここで塩化物イオンはイオン半径が $1.6 \times 10^{-10} \text{m}$ 程度であるので、塩化物イオンはイオン単独の形ではなく、いくつかの水分子を伴った形で HC の層間に固定されると考えられる。したがって、本研究においては、塩素固定化材と名称を統一した。

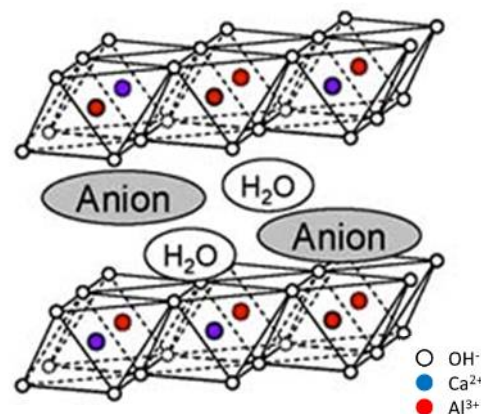


図 3.1.1 層状複水酸化物の結晶構造の概要¹⁾

まず、塩素固定化材として用いる CA_2 粉末の粒度分布を制御して、モルタルやコンクリートに混和した際のフレッシュ性状や乾燥収縮性状になるべく影響を与えないような制御技術について検討した。

次に、断面修復材として広く一般的に用いられるポリマーセメントモルタルに塩素固定化材を混和したものについて、物質浸透抑制性能と、塩化物イオンの固定化能力などに着目し、その基礎物性について検討した。

さらに、塩害を受けるコンクリート構造物の断面修復工法を模擬した供試体を作製し、塩化物イオンを混和したコンクリートと断面修復材の打継ぎ界面付近の鉄筋腐食および塩化物イオンの移動挙動について検討を行った。特に塩素固定化材を混和した断面修復材を打ち継いだ場合、打継ぎ界面付近の鉄筋腐食やコンクリートからモルタルへの塩化物イオンの移動挙動がどのような影響を受けるのかについて着目した。

また、これらの塩化物イオンの移動挙動メカニズムをモデル化し、数値解析を試みた。さらに

塩害を受けるコンクリート構造物の断面修復工法を模擬したシミュレーションを実施し、塩素固定化材を用いた断面修復材およびそれを用いた断面修復工法の耐久性について、数値解析的検討を行った。

3.2 セメント種類や粒度分布が異なる塩素固定化材を用いた場合のセメント硬化体の基礎物性

本節では、 CA_2 を主成分とする塩素固定化材を混和したセメント硬化体について、セメント種類や粒度分布が異なるものを用いた場合、セメント硬化体の圧縮強度や塩化物イオンの固定化能力などにどのような影響を与えるかについて検討した。

3.2.1 使用材料

本検討で用いた材料を表 3.2.1 に示す。普通ポルトランドセメント（以下、OPC と称す）、早強ポルトランドセメント（以下、HPC と称す）および低熱ポルトランドセメント（以下、LPC と称す）は、市販品を用いた。

表 3.2.1 使用材料

水	上水道水
セメント	普通ポルトランドセメント（密度:3.15g/cm ³ ） 早強ポルトランドセメント（密度:3.13 g/cm ³ ） 低熱ポルトランドセメント（密度:3.23 g/cm ³ ）
砂	ISO 標準砂（密度:2.64g/cm ³ ）
CA_2	合成品（密度:2.96g/cm ³ ）
NaCl	試薬 1 級

塩素固定化材である CA_2 は工業原料の炭酸カルシウムと酸化アルミニウムを出発原料とし、 CaO/Al_2O_3 のモル比が 0.5 となるように計量したものに振動ポットミルで粉砕混合を行い、水分を適量加えて造粒したものを、キルン内温度を 1,750℃～1,850℃に保持したロータリーキルンにて焼成して合成した。徐冷して得られたクリンカーをローラーミルにてブレン値 3,000cm²/g に粉砕したもの（以下、未分級品と称す）と、それを空気式乾式分級機〔エルボージェット分級機：マツボー社製〕にて粒度分布を調整したもの（以下、分級品と称す）を用いた。図 3.2.1 に CA_2 の粒度分布を示す。分級することで、粒子直径が 10 μm 以下の微粒の含有率が約 26%から 5%まで低下している。試験で用いた普通ポルトランドセメントと CA_2 の化学成分と物理特性を表 3.2.2 に示す。

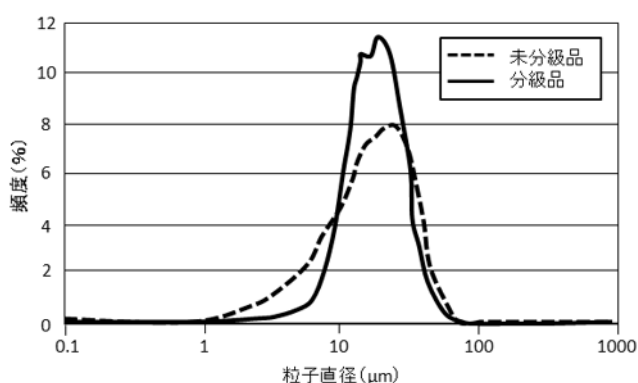


図 3.2.1 CA_2 粉末の粒度分布

表 3.2.2 試験で用いた各種セメントと CA₂ の化学成分と物理特性

	化学成分 (mass%)								ブレン 値 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	R ₂ O	Total Cl		
OPC	64.7	20.9	5.4	1.8	2.9	0.9	0.5	0.013	3,120	3.15
HPC	62.4	19.4	5.5	5.6	4.1	0.9	0.8	0.016	4,440	3.13
LPC	60.1	23.4	4.1	5.0	5.0	0.9	0.6	0.006	3,270	3.23
CA ₂ (未分級)	23.9	0.6	67.7	0.0	7.1	0.3	0.2	-	3,000	2.96
CA ₂ (分級)	24.0	0.6	67.7	0.0	7.1	0.3	0.2	-	2,000	2.96

3.2.2 試験方法

試験や分析はセメントペーストまたはモルタルを調整して評価した。いずれも水／結合材比は 50mass%とした。結合材と砂の比率は質量比で 1 対 3 である。砂は JIS R5201「セメントの物理試験方法」に準じた砂を用いた。ペーストを調整する際は、ブリーディングの影響を考慮し、練り混ぜから数時間まで 1 時間おきに再練りする操作を繰り返し行い、2×2×8cm の角柱供試体を作製した。CA₂はセメントに対して 5mass%置換して混和した。なお、一部のペースト供試体については塩化物イオンの固定化能力を評価するため 1.4mass%NaCl 溶液を用いて同様に供試体を作製した。なお、1.4mass% NaCl 溶液は単位セメント量 300kg のコンクリートに換算すると、Cl-量として 1.2kg/m³に相当する量である。モルタル供試体は、4×4×16cm の角柱供試体と、一部については長さ変化率の測定のためにあらかじめ基長を測定した棒鋼を埋め込んだ 4×4×16cm の角柱供試体を作製した。表 3.2.3 に各供試体におけるセメント部の配合割合を示す。

表 3.2.3 供試体名とセメント部の配合割合

供試体名	セメント種類と 配合率 (%)	CA ₂ 種類と配合率 (%)	
		未分級品	分級品
OPC	OPC 100	—	—
OPC_CA ₂	OPC 95	5	—
OPC_C-CA ₂	OPC 95	—	5
HPC	HPC 100	—	—
HPC_CA ₂	HPC 95	5	—
LPC	LPC 100	—	—
LPC_CA ₂	LPC 95	5	—

(1) モルタルフロー

モルタルフローの測定は OPC を使用した供試体のみ実施した。JIS R5201 に準じて測定し、練り上がり直後からの経時変化を測定した。測定間隔は練り上がり直後を 0 分とし、30 分、60 分および 120 分とした。試験は 20℃80%R.H.の恒温恒湿室内にて行った。

(2) 圧縮強度

圧縮強度は、JIS R5201 に準じて測定し、材齢 7 日、28 日および 91 日で測定した。

(3) 長さ変化率

長さ変化率の測定は OPC を使用した供試体のみ実施した。JIS A6202「コンクリート用膨張材」の附属書 2 に示される長さ変化率の測定方法のうち、B 法に準じて測定した。材齢 1 日で脱型後、材齢 7 日まで 20℃水中養生を行い、その後 20℃60%R.H.の恒温恒湿室内に静置した。

(4) セメントペースト中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量の定量

材齢 28 日まで 20℃恒温室内で封緘養生を行ったセメントペースト供試体について、セメント水和物の一種である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (以下、CH と称す) の生成量を熱分析 (TG-DTA) により定量し、比較した。本研究では、 CA_2 をセメントに混和することにより、HC を多量に生成させる提案をしているが、この際には、2.3 節の式 [2] で示したように、セメントの水和から生じる CH を消費すると考えられるからである。ただし、セメントの種類および CA_2 混和の影響で結合水量が異なり、TG-DTA から求められる値からは正しい比較ができないと考え、強熱減量によって得られた結合水量を除いた未反応粉体に対する無水物換算 (CaO 量) で示した。

(5) セメントペースト中の全塩化物の定量

1.4mass%NaCl 溶液を用いて作製したセメントペースト供試体を 2 日で脱型後材齢 7 日まで 20℃水中、その後は 20℃60%R.H.の乾燥養生を行った。材齢 28 日において JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に従い、全塩化物イオンを定量した。また、JIS A1154 の附属書に従って、温水抽出塩化物イオン量についても定量を行った。温水抽出塩化物イオン量を可溶性塩化物イオンとみなし、全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量の差を固定化塩化物イオン量と定義した。塩化物イオン量について可溶性塩化物イオンと固定化塩化物イオンを区別して検討するのは、 CA_2 の混和により HC を多量に生成させているため、塩化物イオンの作用を受けた際に HC がフリーデル氏塩に化学反応によって変化するものと考えられ、フリーデル氏塩の結晶内に固定化される塩化物イオン量が増えると考えられるからである。

3.2.2 試験結果

(1) モルタルフロー

モルタルフローの試験結果を図 3.2.2 に示す。 CA_2 を混和した系は、無混和の系と比較するとフローダウンが大きい。しかし、 CA_2 の分級品を混和した系は未分級品と比較すると 30 分経過時のフローダウンが改善されている。60 分以降のフローダウンは無混和の系と比較するとやや大きい。しかし、 CA_2 の未分級品を混和した系と比較すると改善されている。これは、 CA_2 の分級品が未分級品に比べて、 $10\mu\text{m}$ 以下の微粒子の含有量が小さくなっているため、練混ぜ直後から 120 分程度までの CA_2 の水和反応が未分級品に比べて抑制されたためと考えられる。

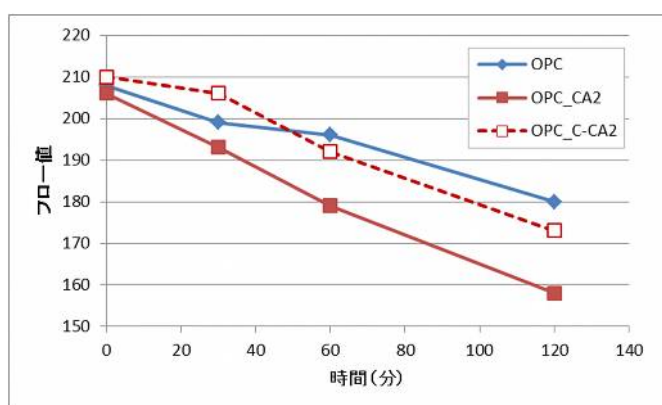


図 3.2.2 モルタルフローの経時変化

(2) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を図 3.2.3 に示す。まず、OPC の系について見ると CA_2 を混和したもののうち未分級品は無混和のものに比べて、圧縮強度は同等以上の値を示している。HPC の系についても CA_2 を混和したものは無混和とほぼ同等の値を示している。しかし、LPC の系については傾向が異なり、 CA_2 を混和したものは材齢 91 日において 1 割程度強度が低くなる傾向を示した。

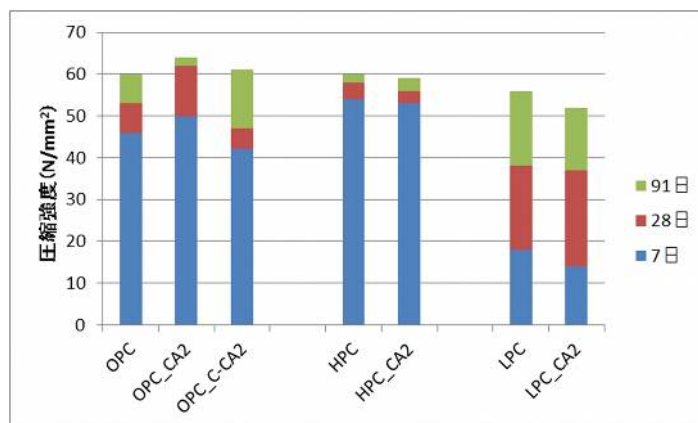


図 3.2.3 圧縮強度

また、 CA_2 の分級品を混和したものは無混和の OPC に比べて材齢 28 日までの圧縮強度はやや小さい値を示すが、材齢 91 日においてはほぼ同等の値を示しており、長期材齢においては CA_2 の分級により圧縮強度に大きな影響は及ぼさないと考えられる。

(3) 長さ変化率

長さ変化率の測定結果を図 3.2.4 に示す。 CA_2 を無混和の系は材齢 28 日において約 530×10^{-6} の収縮を示した。同様に CA_2 の未分級品を混和した系は約 650×10^{-6} 、 CA_2 の分級品を混和した系は約 610×10^{-6} の収縮を示した。分級品は無混和の系と比較すると 120×10^{-6} 程度収縮率が大きくなるが、未分級品と比較すると 40×10^{-6} 程度収縮を低減することがわかった。これは、 CA_2 分級品の方がより生成される HC 量が少ないためと考えられる。HC はセメントの乾燥収縮に大きく寄与するモノサルフェート²⁾と類似の層状構造を持つため、HC の生成量が多いほど乾燥収縮は大きくなるものと考えられる。

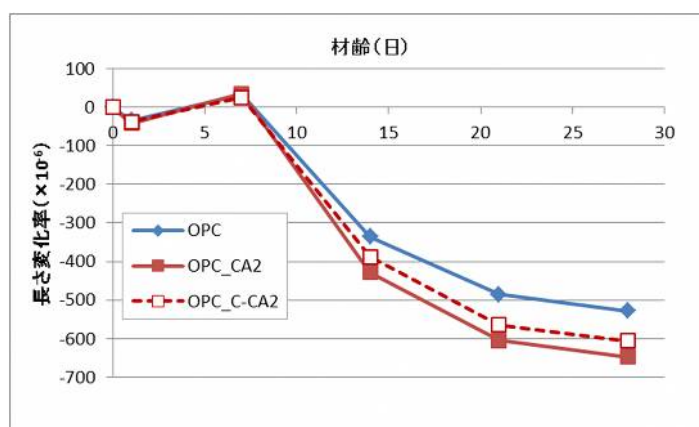


図 3.2.4 長さ変化率

(4) セメントペースト中の $Ca(OH)_2$ 量

TG-DTA によって定量されるセメントペースト中の CH 生成量および結合水量を図 3.2.5 に示す。CH 生成量はすべてのセメント種類において、 CA_2 無混和の方が小さい。

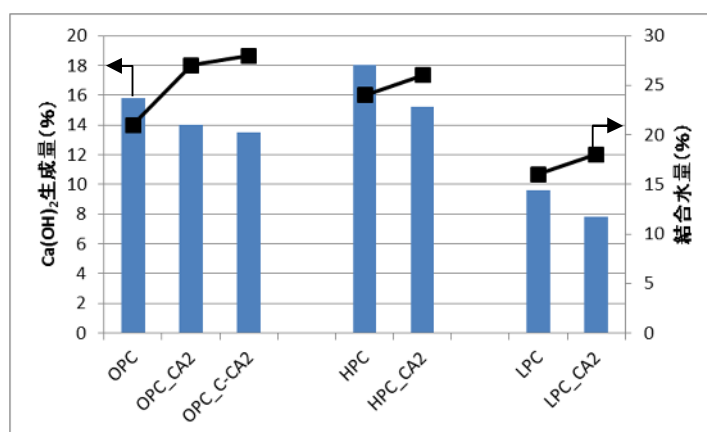


図 3.2.5 CH 生成量および結合水量

一方、結合水量は無混和のものに比べて高い値を示し、水和反応は十分に進行していることがうかがえる。したがって、 CA_2 を混和した系でCHの生成量が小さいのはセメントの水和が遅延しているためではなく、 CA_2 がCHと反応しているためであると考えられる。また、 CA_2 の分級品と未分級品を比較してもCH生成量及び結合水量に大きな相違はなく、微粉末を除去したことによりHC生成に関する反応性の著しい低下などの影響はなかったものと考えられる。

以上より、セメント硬化体中において CA_2 とCHが反応してHCが生成しているものと考えられるので、次に塩化物イオンの固定化能力を評価した。

(5) セメントペースト中の全塩化物イオン量

1.4mass%NaCl溶液を用いて練り混ぜを行ったセメントペースト中の塩化物イオン量の測定結果を図3.2.6に示す。

CA_2 の混和により、無混和のものに比べて固定化塩化物イオン量が増えている。試験を実施したすべての種類のセメントにおいてその効果が確認できる。これは、細孔溶液中に存在する可溶性塩化物イオンをHCがフリーデル氏塩として化学的に固定化したためと考えられる。このなかでLHC

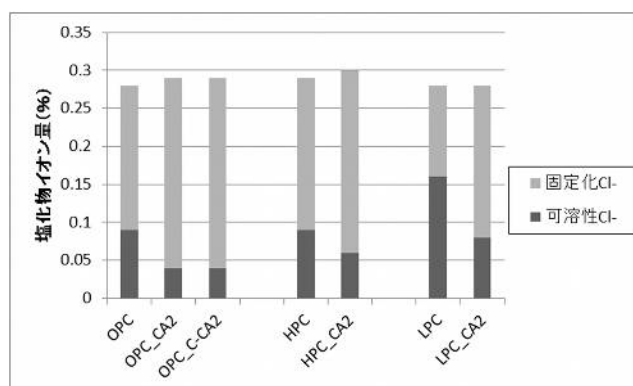


図 3.2.6 塩化物イオン量

における効果は特に顕著であり、無混和のものでの固定化塩化物イオンは全体の半分以下であるが、 CA_2 を5%混和することで、7割以上が固定化されている。LHCは C_3A など間隙層の含有量が小さく、セメントの水和反応で生成されるモノサルフェートの生成量が少ない。モノサルフェートは塩化物イオンの固定化能力があることが知られており、LHC単独ではモノサルフェートの生成量が少ないため、固定化能力が小さくなったものと考えられる。一方、LHCに CA_2 を混和したものは、OPCやHPCに比較すると量は少ないと考えられるが、LHCから生成するCHと CA_2 が反応してHCが生成するため、固定化能力が大きく向上したものと考えられる。

また、分級品と未分級品の固定化塩化物イオン量には大きな相違はなく、本研究で検討した程度の分級では、 CA_2 の塩化物イオンの固定化能力には大きな影響はないと考えられる。

3.2.3 本節のまとめ

(1) CA_2 を混和し、水和させた各種ポルトランドセメント中のCH量は試験を実施したセメント種類に関わらず減少した。これは CA_2 とCHが反応し、HCが生成したためと考えられる。

(2) 塩化物と CA_2 を混和し、水和させた各種セメントペースト中の固定化塩化物イオン量はセメント種類に関わらず CA_2 無混和のものよりも増加した。 CA_2 は混和するセメント種類に関わらず塩化物イオンの固定化能力があるものと考えられる。

(3) OPCに粒度分布の異なる CA_2 を混和したモルタルについて、無混和のものと比較するとフローダウンと乾燥収縮の増加が生じたが、粒度分布を制御することで30分までのフローダウンと乾燥収縮の抑制が可能であることが分かった。

(4) 塩化物と CA_2 を混和し、水和させた各種セメントペースト中の固定化塩化物イオン量は

CA₂無混和のものよりも増加した。CA₂の粒度分布の違いによる関わらずほぼ同等であった。

以上の結果から、CA₂の塩素固定化材としての性能は、セメント種類にはあまり影響を受けないことが分かった。また、CA₂を混和することによりフローダウンと乾燥収縮の増加が懸念されるが、粒度分布を制御することにより、ある程度コントロールが可能であることが分かった。

3.3 塩素固定化材を混和したポリマーセメントモルタルの基礎物性

本節では、カルシウムアルミネートのCA₂を主成分とする塩素固定化材をポリマーセメントモルタル中に混和したものについて、物質浸透抑制性能と、塩化物イオンの固定化能力などに着目し、その基礎物性について検討した。

3.3.1 使用材料および試験配合

本検討で用いた材料を表3.3.1に示す。断面修復工法のうち、左官工法として用いられる配合を参考に、砂／セメント比＝1.5／1、ポリマー／セメント比＝5％、水／セメント比＝45％の配合をポリマーセメントモルタルの基準配合とした。

塩素固定化材であるCA₂は工業原料の炭酸カルシウムと酸化アルミニウムを出発原料とし、CaO/Al₂O₃のモル比が0.5となるように計量したものに振動ポットミルで粉碎混合を行い、水分を適量加えて造粒したものを、キルン内温度を1,750℃～1,850℃に保持したロータリーキルンにて焼成して合成した。徐冷して得られたクリンカーをローラーミルにてブレン値3,000cm²/gに粉碎したものを用いた。試験で用いた普通ポルトランドセメントの化学成分と物理特性を表3.3.2に示す。なお、前節で検討した分級については、工業的な生産ができないため、ここでは未分級のものを検討対象とした。

モルタルは基準配合のセメントに対して、内割の質量比率で1％、3％、5％のCA₂を置換したものを試験に用いた。試験に用いたセメント配合を表3.3.3に示す。

表 3.3.1 使用材料

水	上水道水
セメント	普通ポルトランドセメント (密度:3.15g/cm ³)
砂	5号珪砂 (密度:2.64g/cm ³)
ポリマー	ポリアクリル酸エステル (PAE)系粉末ポリマー
CA ₂	合成品 (密度:2.96g/cm ³)

表 3.3.3 試験配合

名称	CA ₂ 置換率 (質量比)
CA ₂ _0%	0%
CA ₂ _1%	1%
CA ₂ _3%	3%
CA ₂ _5%	5%

表 3.3.2 試験で用いた OPC と CA₂ の化学成分と物理特性

	化学成分 (mass%)								ブレン値 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	R ₂ O	Total Cl		
OPC	64.7	20.9	5.4	1.8	2.9	0.9	0.5	0.013	3,120	3.15
CA ₂	23.9	0.6	67.7	0.0	7.1	0.3	0.2	-	3,000	2.96

3.3.2 試験方法

(1) 供試体作製方法

前項で示した配合のうち、水以外の材料が全量で 2000g となるように計量しておく。次に 20℃ 80%R.H.の恒温恒湿室内にて JIS R5201「セメントの物理試験方法」に示されるモルタルミキサに計量した材料に対応する水を投入する。その後、2000g の材料を投入し、低速で 30 秒練り混ぜ、一度掻き落としを行い、その後低速で 90 秒練り混ぜてモルタルを得た。

(2) モルタルフローおよび凝結時間

モルタル練混ぜ直後に JIS A1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」で示されるフロー試験を実施し、その後 JIS A1147「コンクリートの凝結時間試験方法」で示される凝結時間測定試験の始発時間を測定した。

(3) 曲げ強度、圧縮強度および付着強度

曲げ強度および圧縮強度については、JIS A1171 に準拠し、材齢 7 日および 28 日で試験を行った。付着強度については、JIS A1171 に準拠し、材齢 7 日および 28 日で試験を行った。

(4) 長さ変化率

JIS A1171 に準拠し、40×40×160mm のモルタル供試体を作製し、材齢 7 日まで水中養生を行い、基長を測定した。基長の測定開始から 1 日、3 日、7 日、14 日、28 日時点での長さ変化率を測定した。

(5) 中性化深さ

JIS A1171 に準拠し 100×100×100mm のモルタル供試体を作製し、材齢 28 日まで養生を行い、側面を除く 5 面についてエポキシ樹脂を塗布したモルタル供試体を、30℃、60%R.H.、CO₂濃度 5%の促進中性化槽に静置し、促進試験開始から 28、56、91 日で中性化深さを測定した。図 3.3.1 に供試体の概要を示す。

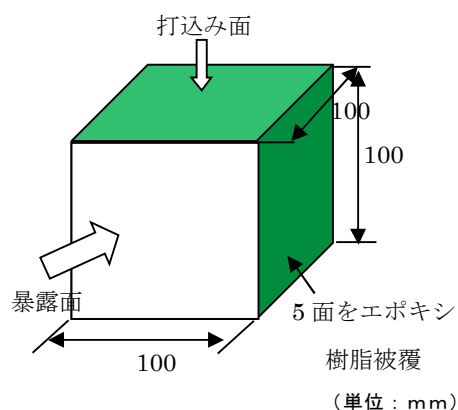


図 3.3.1 中性化および塩化物イオン浸透深さ測定供試体の概要

(6) 塩化物イオン浸透深さ

JIS A1171 に準拠して、100×100×100mm のモルタル供試体を作製し、材齢 28 日まで養生を行い、側面を除く 5 面についてエポキシ樹脂を塗布したモルタル供試体を、供試体の体積の 10 倍の体積量の 3mass%の NaCl 溶液に浸せきした。浸せき後のモルタルを割裂し、0.1%フルオレセイン

ナトリウム水溶液と 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧して蛍光を発する部分を塩化物イオンの浸透深さとして測定した。試験開始から 28, 56, 91 日で塩化物イオンの浸透深さを測定した。図 3.3.1 に供試体の概要を示す。

(7) 塩化物イオン量

塩化物イオン量の測定は、前項で示した材料のうち、砂を除いたポリマーセメントペースト供試体を作製し、20×20×80mm の供試体を作製した。練混ぜ水は 1.4% の NaCl 溶液を用いて作製し、2 日で脱型後材齢 7 日まで 20℃水中、その後は 20℃60%R.H.の乾燥養生を行った。材齢 28 日時点で JISA1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じて全塩化物イオン量を定量した。また、JIS A1154 の附属書に従って、温水抽出塩化物イオン量についても定量を行った。温水抽出塩化物イオン量を可溶性塩化物イオンとみなし、全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量の差を固定化塩化物イオン量と定義した。

3.3.3 試験結果

(1) モルタルフローおよび凝結時間

モルタルフロー試験および凝結始発時間の結果を図 3.3.2 に示す。

CA₂ の混和率が増加するに伴い、フローは小さくなり、凝結始発時間は短くなる傾向となった。CA₂ はカルシウムアルミネート類の中では水和反応性が低いものではあるが、若干の水和反応性を示すためと考えられる。

しかし、CA₂ の混和率が 5% の条件のモルタルフローでも写真 3.3.1 に示すように左官材料として問題なく施工できる範囲であり、凝結時間も CA₂ 無混和に比べて約 40 分早くなる程度であり、本節で行った CA₂ の混和率の試験条件では、左官工法用の断面修復材として十分に適用できると考えられる。

(2) 曲げ強度、圧縮強度および付着強度

曲げ強度、圧縮強度および付着強度の試験結果を図 3.3.3～3.3.5 に示す。

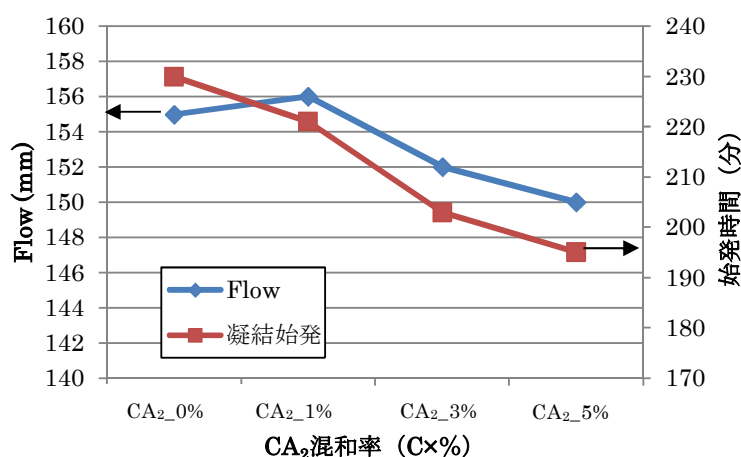


図 3.3.2 モルタルフローおよび凝結始発時間



写真 3.3.1 CA₂ 混和率 5% のモルタルのコテ塗り状況

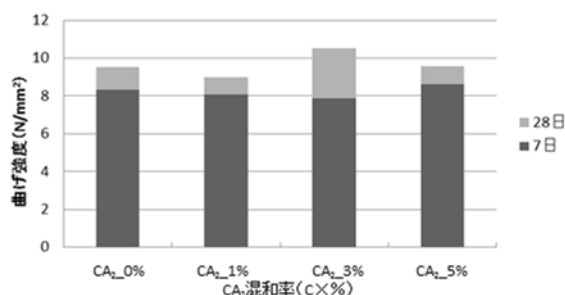


図 3.3.3 圧縮強度

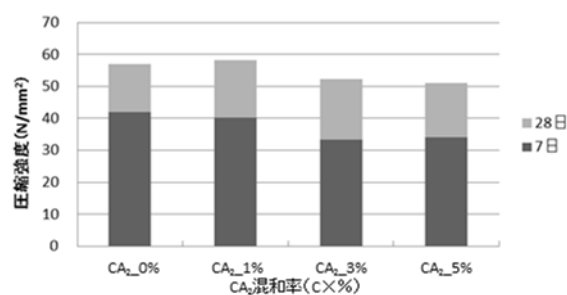


図 3.3.4 曲げ強度

図 3.3.3 より，CA₂を混和したポリマーセメントモルタルの圧縮強度は，既往の研究⁶⁾と同様に CA₂の混和率が増加するほど，若干低下する傾向を示している。

一方，図 3.3.4 および図 3.3.5 より，曲げ強度および付着強度については，CA₂の混和率が増加しても強度が低下する傾向は見られなかった。ポリマーによる曲げおよび付着強度の改善効果は，CA₂の混和には大きな影響を受けないものと考えられる。

(3) 長さ変化率

長さ変化率の試験結果を図 3.3.6 に示す。

CA₂の混和率が増加するほど，長さ変化率は大きくなる傾向を示す。これは，既往の研究¹⁾より，CA₂を混和することにより，セメント硬化体の組織は緻密になるので，自己収縮量が増加するためと考えられる。

一般に，長さ変化率はポリマーセメントモルタルを断面修復材として適用する際，ひび割れに対する耐久性を評価する重要な指標となる。したがって，今後 CA₂を混和したポリマーセメントモルタルを断面修復材として適用する場合は，長さ変化率を抑制するような対策，例えば膨張材や収縮低減剤との併用などを考慮する必要があると考えられる。

(4) 中性化深さ

中性化深さの試験結果を図 3.3.7 に示す。

促進試験期間でごとに多少ばらつきはあるが，おおむね CA₂の混和率が増加するほど中性化深さは小さくなる傾向を示す。

これは，盛岡ら³⁾の研究より，CA₂を混和することにより，セメント硬化体の組織は緻密になるためと考えられる。このことから，CA₂をポリマーセメントモルタルに混和しても，ポリマーによる二酸化炭素の遮断効果を損なうことなく，さらに CA₂によるセメント硬化体組織の緻密化により中性化抵抗性が向上するものと考えられる。

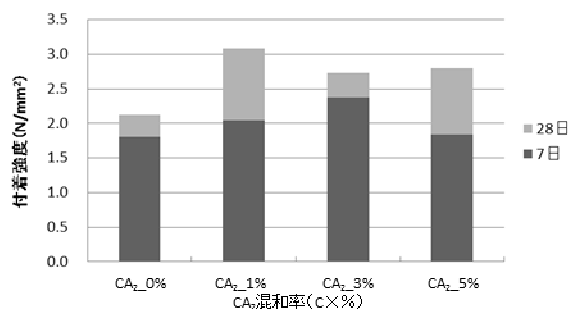


図 3.3.5 付着強度

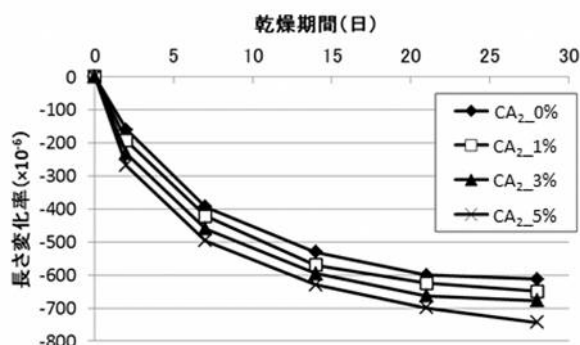


図 3.3.6 長さ変化率

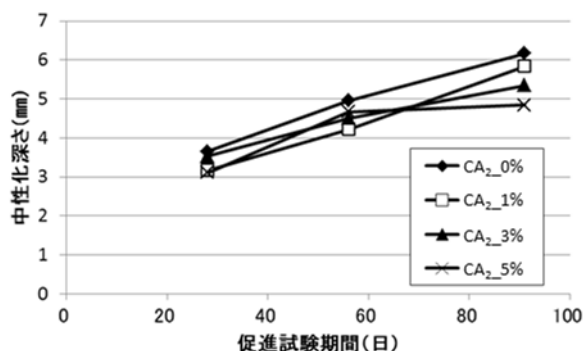


図 3.3.7 中性化深さ

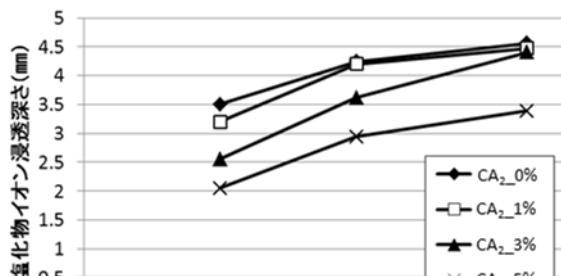


図 3.3.8 塩化物イオン浸透深さ

(5) 塩化物イオン浸透深さ

塩化物イオン浸透深さの結果を図 3.3.8 に示す。CA₂ の混和率が増加するほど、塩化物イオン浸透深さは小さくなる傾向を示すが、促進試験期間 91 日時点において、無混和のものと明確な差を認めるためには CA₂ を 5% 混和する必要がある。

(6) 塩化物イオン量

塩化物イオン量の測定結果を図 3.3.9 に示す。

CA₂ の混和率が増加するほど、全塩化物イオン量に占める固定化塩化物イオン量が増加し、CA₂ 混和率 5% では、可溶性塩化物イオン量は無混和に比べて半減した。このことから、CA₂ を混和したポリマーセメントモルタルにおいても田原ら⁴⁾の研究で示されているセメントモルタルと同様の塩化物イオン固定化能力を示すものと考ええる。

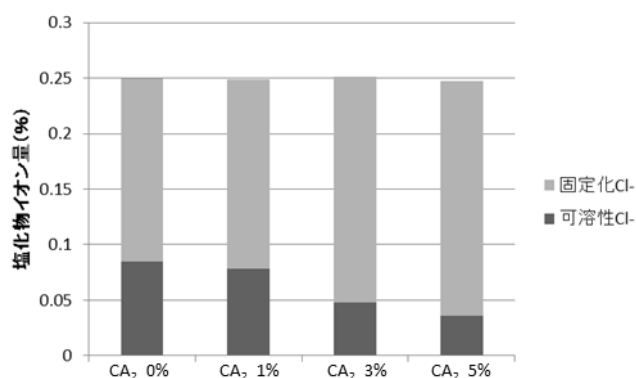


図 3.3.9 塩化物イオン量

3.3.4 本節のまとめ

(1) カルシウムアルミネート (CA₂) を主成分とする塩素固定化材を混和したポリマーセメントモルタルは CA₂ の混和に伴い、圧縮強度は若干低下するが、曲げ強度や付着強度には大きな影響を与えない。一方、長さ変化率は大きくなる。

(2) CA₂ を混和したポリマーセメントモルタルは CA₂ を混和しないものに比べて塩化物イオン固定化能力、塩化物イオン抑制および中性化抑制能力を有し、その有効な混和率は、セメントに対して 5% である。

3.4 塩素固定化材を混和したモルタルと内在塩分を有するコンクリートを打ち継いだ場合の打ち継界面付近の鉄筋腐食および塩化物イオン移動挙動

本節では、断面修復工法において、塩素固定化材を混和したモルタルと内在塩分を有するコンクリートを打ち継いだ場合の界面付近の鉄筋腐食および塩化物イオンの移動挙動について実験的に検討を行った。

3.4.1 使用材料および試験配合

(1) 使用材料

普通ポルトランドセメントおよびカルシウムアルミネート (CA₂) を主成分とする塩素固定化材は 3.2 節で用いたものと同じものを用いた。モルタルおよびコンクリートの作製に用いたその他の材料について表 3.4.1 および表 3.4.2 に示す。

表 3.4.1 モルタルに用いた材料

水	上水道水
砂	ISO 標準砂
ポリマー	アクリル樹脂系粉末ポリマー
増粘剤	メチルセルロース系増粘剤
消泡剤	シリコン系消泡剤

表 3.4.2 コンクリートに用いた材料

水	上水道水
砂	姫川産砕砂（密度:2.62g/cm ³ ）
砂利	姫川産碎石（密度:2.66 g/cm ³ ）
減水剤	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤
NaCl	試薬 1 級

表 3.4.1 に示した材料のうち、増粘剤はモルタルのブリーディングの発生を抑制するため、消泡剤はモルタルの空気量を $5\pm 1\%$ に調整するため適宜混和した。

(2) モルタル配合

表 3.4.3 にモルタル配合を示す。モルタル配合は砂／セメント比＝2／1、水／セメント比＝50％の配合をモルタルの基準配合（NM）とし、ポリマー／セメント比が 10％のポリマーセメントモルタル（PMM）も検討の対象とした。基準配合のモルタル中のセメントに対して、内割で 5％および 10％を CA₂ で置換したもの（NCA5 および NCA10）を試験に用いた。また、ポリマーセメントモルタルに対しては、セメントに対して内割で 5％を CA₂ で置換したもの（PCA5）を用いた。なお、表中の P はポリマーを示す。

表 3.4.3 モルタル配合（単位：kg/m³）

配合名	配合						
	W	S	OPC	CA ₂	P	消泡剤	増粘剤
NM	315	1260	630	—	—	3.2	0.6
PMM			630	—	63	6.3	
NCA5			598.5	31.5	—	3.2	
NCA10			567	63	—	3.2	
PCA5			598.5	31.5	63	6.3	

(3) コンクリート配合

コンクリート配合は、目標強度 24N/mm²、空気量 4.5±1％、W/C＝57％、s/a＝50％、Gmax＝13mm とし、混和する塩化物イオン量は 10kg/m³ を目標として試薬の NaCl を外割で混和した。表 3.4.4 にコンクリート配合を示す。また、表 3.4.5 に材齢 28 日での圧縮強度および JISA1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠して測定した全塩化物イオン量の測定結果を示す。

表 3.4.4 コンクリート配合

W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	Air (%)	配合(kg/m ³)					
				W	C	S	G	Add	NaCl
57	13	50	4.5±1	170	298	900	914	0.90	16.5

表 3.4.5 圧縮強度および全塩化物イオン量

圧縮強度(N/mm ²)	全塩化物イオン量(kg/m ³)
28.8	9.6

3.4.2 試験方法

(1) 供試体作製方法

供試体は図 3.4.1 に示すように、コンクリートにモルタルを打ち継ぐように、100×100×400mm 供試体を作製した。供試体にはφ13mm の磨き棒鋼をかぶり 30mm で配置し、モルタルとコンクリート内部に分割鉄筋を配置する、断面修復部と躯体コンクリート部との分割鉄筋間に流れる電流を測定することができる【分割鉄筋供試体】とモルタルとコンクリートの界面を貫通する形で配置し、鉄筋の電位を測定する【連続鉄筋供試体】の 2 種類を作製した。

コンクリート打設後、材齢 28 日まで 20℃恒温室内で封緘養生した。その後、打ち継ぎ面をサンドブラスト処理した後にモルタルを打ち継いだ。コンクリートの打ち継ぎ面は水湿しのみを行った。モルタル打込み後、20℃60%R.H.恒温恒湿室内に存置し、所定の材齢で試験を行った。

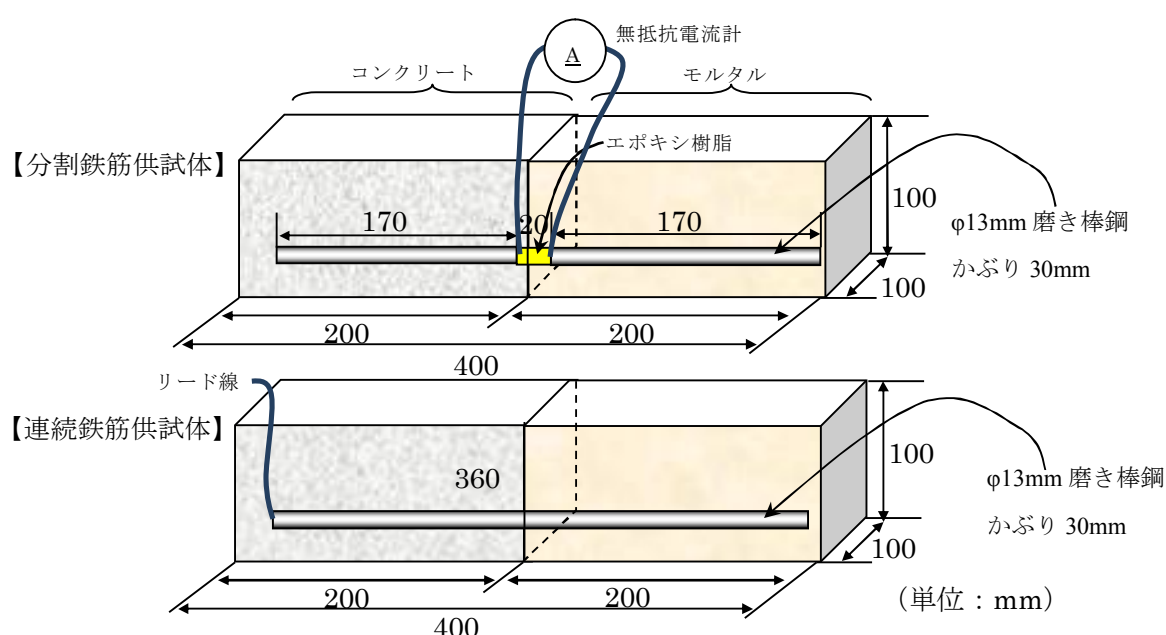


図 3.4.1 供試体概要

(2) モルタルとコンクリート界面で生じる鉄筋腐食電流量

分割鉄筋供試体を用いてモルタルとコンクリートの界面で生じる鉄筋の腐食電流量を無抵抗電流計で測定した。モルタルを打込み後、20℃、60%R.H.環境に存置し、3、14、28、56、91、642 日で測定した。

(3) 鉄筋の自然電位

連続鉄筋供試体を用いてモルタルとコンクリート部鉄筋の自然電位を測定した。測定はデジタルマルチメータの電圧測定モードを使用した。なお、使用したデジタルマルチメータの電圧の分解能は 0.1mV で、確度は±0.5%である。デジタルマルチメータの一方をリード線につなぎ、も

う一方を銅/硫酸銅飽和溶液電極（CSE）につなぎ、銅/硫酸銅飽和溶液電極をかぶりコンクリート表面に押し当て、電位を測定した。モルタルとコンクリートの打継ぎ界面からコンクリート側に 25mm 位置で測定した。モルタルを打込み後、20℃環境に存置し、3, 14, 28, 56, 91, 642 日で測定した。

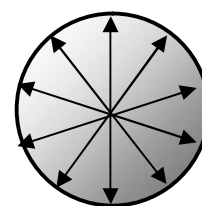


図 3.4.2 鉄筋直径の測定方向

(4) 鉄筋腐食状況

連続鉄筋供試体の 642 日後の自然電位の測定後、供試体を解体し、鉄筋の腐食状況を確認した。

(5) 鉄筋腐食量

3.4.2(4)の状況確認後の供試体から鉄筋を取り出し、クエン酸水素 2 アンモニウム 10%溶液に浸し 60℃で 24 時間保持し、錆を溶解させた。その後、打継ぎ界面からモルタル側とコンクリート側に 2mm ごと、5cm まで図 3.4.2 に示すような方向でノギスを用いて 5 点直径を計測し、平均値を元の値（13mm）から差し引くことで鉄筋腐食量とした。

(6) 塩化物イオン量

3.4.2(4)の状況確認後の供試体から図 3.4.3 に示すように、打継ぎ界面からモルタル側とコンクリート側に 1cm ごと、5cm まで供試体を乾式の高速カッターで切り出し、供試体を 150 μ m 以下まで全粉碎して、JISA1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠して試料中の全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量を測定した。なお、固定化塩化物イオン量は、全塩化物イオン量から可溶性塩化物イオン量を差し引いた値とした。

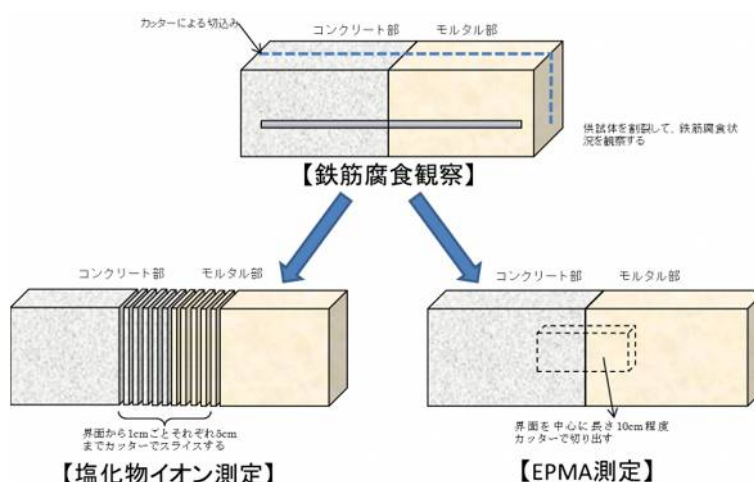


図 3.4.3 供試体の測定方法

(7) 粉末 X 線回折

前節で塩化物イオン量を測定したサンプルのうち、モルタルのサンプルについて、粉末 X 線回折分析を行った。

(8) EPMA

3.4.2(4)の状況確認後の供試体から図 3.4.3 に示すようにモルタルとコンクリートの界面を含むように乾式の高速カッターで厚み 10mm として切り出した供試体について、塩素（Cl）を測定元素として EPMA 分析を行った。分析範囲は 3×4cm の大きさとした。

3.4.3 試験結果

(1) モルタルとコンクリート界面で生じる鉄筋腐食電流量

鉄筋腐食電流の測定結果を図 3.4.4 に示す。試験期間を通じて、コンクリート部の鉄筋が腐食する方向の電流が計測されたので、コンクリート部鉄筋に流れる腐食電流密度として示す。右側の図は 642 日の計測値の拡大図である。

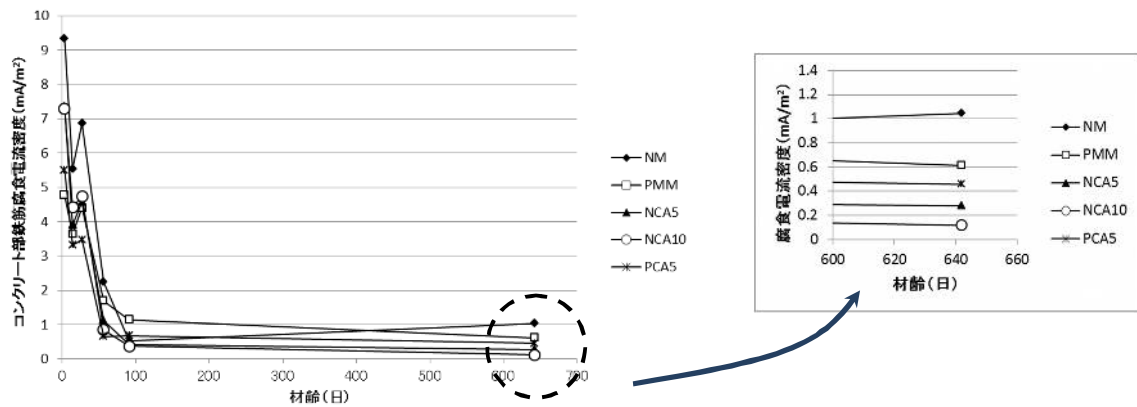


図 3.4.4 鉄筋腐食電流

図 3.4.4 より、腐食電流は時間の経過とともに概ね減少していく傾向が確認された。これは、材齢の進行に伴い、供試体内部が乾燥することや水和が進行しセメントマトリックスが緻密化するため、比抵抗が増大するためと考える。

ここで、材齢 642 日における腐食電流量は、普通モルタルのセメントに 10%の CA_2 を置換した NCA10 が最も小さく、腐食電流密度は比較となる普通モルタルの NM のおおよそ $1/10$ 程度であり、NM に比べると腐食電流は抑制されている可能性があると考え。ポリマーセメントモルタルの PMM と PCA5 を比較しても同様の傾向があり、モルタルに CA_2 を混和することにより、コンクリート部分の鉄筋腐食が抑制されている可能性があると考えられる。

(2) 鉄筋の自然電位

鉄筋の自然電位の測定結果を図 3.4.5 に示す。

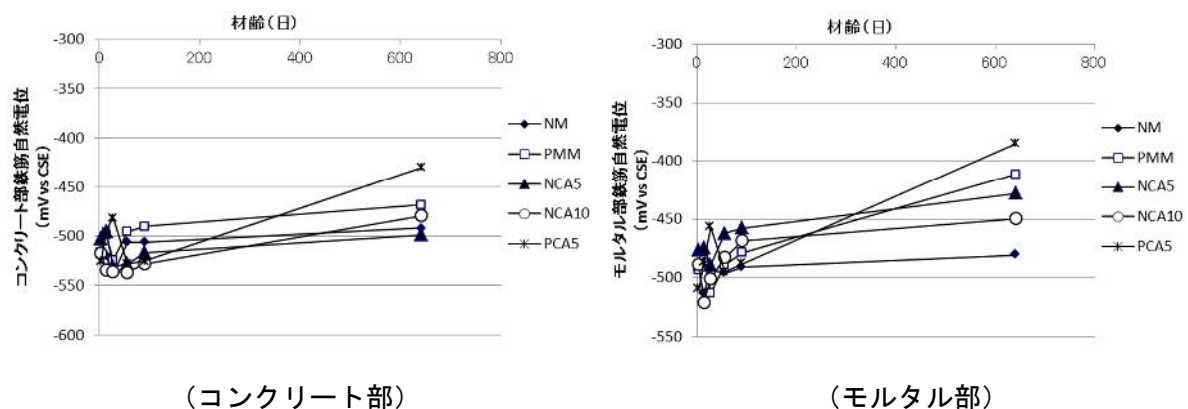


図 3.4.5 鉄筋の自然電位測定結果

自然電位の初期値はコンクリート部およびモルタル部の鉄筋とも -500mV vs CSE 前後であり、鉄筋の腐食可能性が大きい卑な値を示す。その後、試験期間を通じてすべての供試体で自然電位は概ね貴側に移行する傾向を示している。これは、前項で考察したようにコンクリートおよびモ

ルタルの比抵抗が増大したことによる影響と考えられる。642 日時点では、コンクリート部およびモルタル部の鉄筋ともバラつきはあるが、CA₂を混和したモルタルを用いた供試体の自然電位が貴側にある傾向であり、モルタルに CA₂を混和することにより、コンクリート部分の鉄筋腐食が抑制されている可能性があると考えられる。

(3) 鉄筋腐食状況

連続鉄筋供試体の 642 日後の鉄筋の腐食状況について写真 3.4.2 に示す。

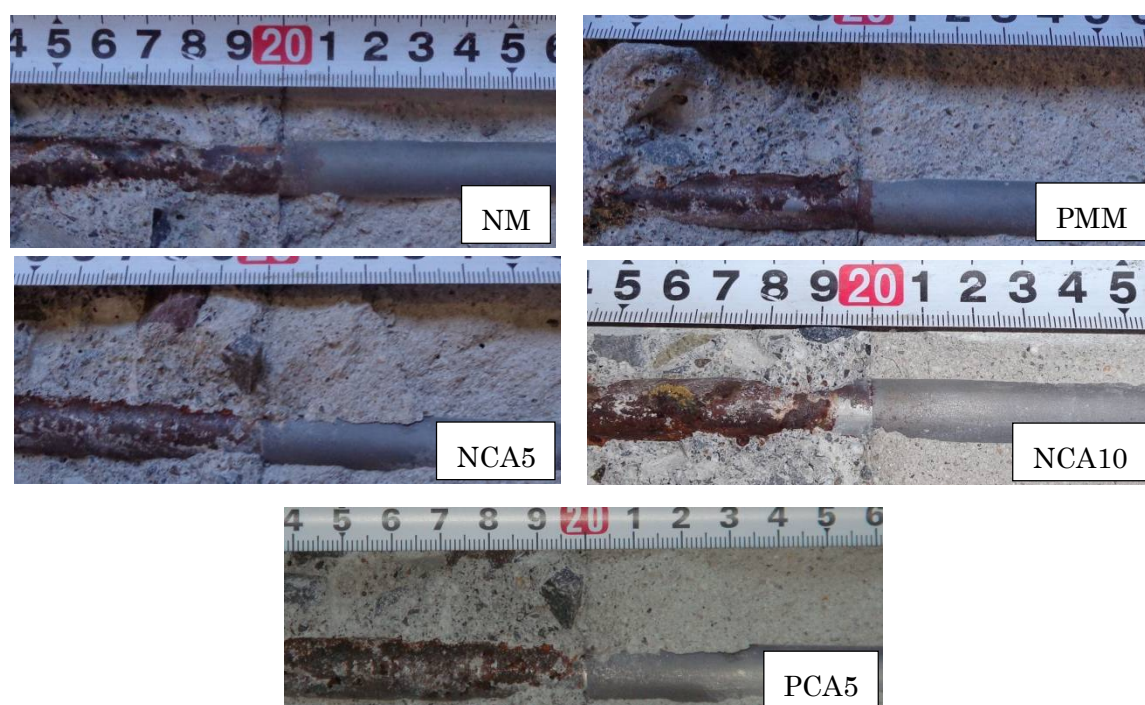


写真 3.4.2 鉄筋腐食状況

写真 3.4.2 より、表 3.4.6 に示すような発錆状況が確認された。

表 3.4.6 鉄筋腐食状況のまとめ

供試体	鉄筋腐食の状況
NM	コンクリート側：全面に錆が見られる モルタル側：界面から 8mm 程度錆の発生が見られる
PMM	コンクリート側：全面に錆が見られる モルタル側：界面から 3mm 程度錆の発生が見られる
NCA5	コンクリート側：全面に錆が見られる モルタル側：全く健全な状態である
NCA10	コンクリート側：錆が見られるものの、界面から 8mm 程度、明らかに錆が少ない部分が見られる モルタル側：全く健全な状態である
PCA5	コンクリート側：全面に錆が見られる モルタル側：全く健全な状態である

表 3.4.6 より、 CA_2 を混和していない NM および PMM では、モルタル側の鉄筋も錆の発生が見られるが、 CA_2 を混和したものはモルタル側の鉄筋はほぼ完全に錆の発生は抑制されている。特に普通モルタルのセメントに CA_2 を 10% 内割置換した NCA10 はモルタル側だけではなく、コンクリート側の鉄筋の発錆も抑制しているようである。

(3) 鉄筋腐食量

鉄筋腐食量の測定結果を図 3.4.6 に示す。図中、鉄筋位置について、0cm が打継ぎ界面であり、マイナスがコンクリート側、プラスがモルタル側であることを示す。

NM と PMM はコンクリート側では全面に、モルタル側でも界面から 0.6cm 程度まで概ね 0.6~0.8mm 程度の鉄筋腐食が見られた。

一方、 CA_2 を混和したモルタルを打ち継いだ NCA5, NCA10 および PCA5 はモルタル側では全く腐食が見られず、さらに界面からコンクリート側に入っても約 0.4~0.8cm 程度まで腐食が見られない領域（鉄筋腐食量 0mm）を確認した。このことは写真 3.4.2 に示した鉄筋腐食状況と概ね一致する。

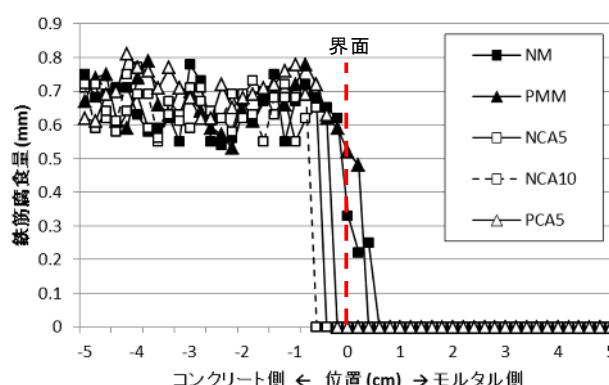


図 3.4.6 鉄筋腐食量

以上のことから、セメントモルタルに CA_2 を混和することにより界面付近の鉄筋腐食は改善される傾向にあることが分かった。

(4) 塩化物イオン量

塩化物イオン量の測定結果を図 3.4.7 に示す。

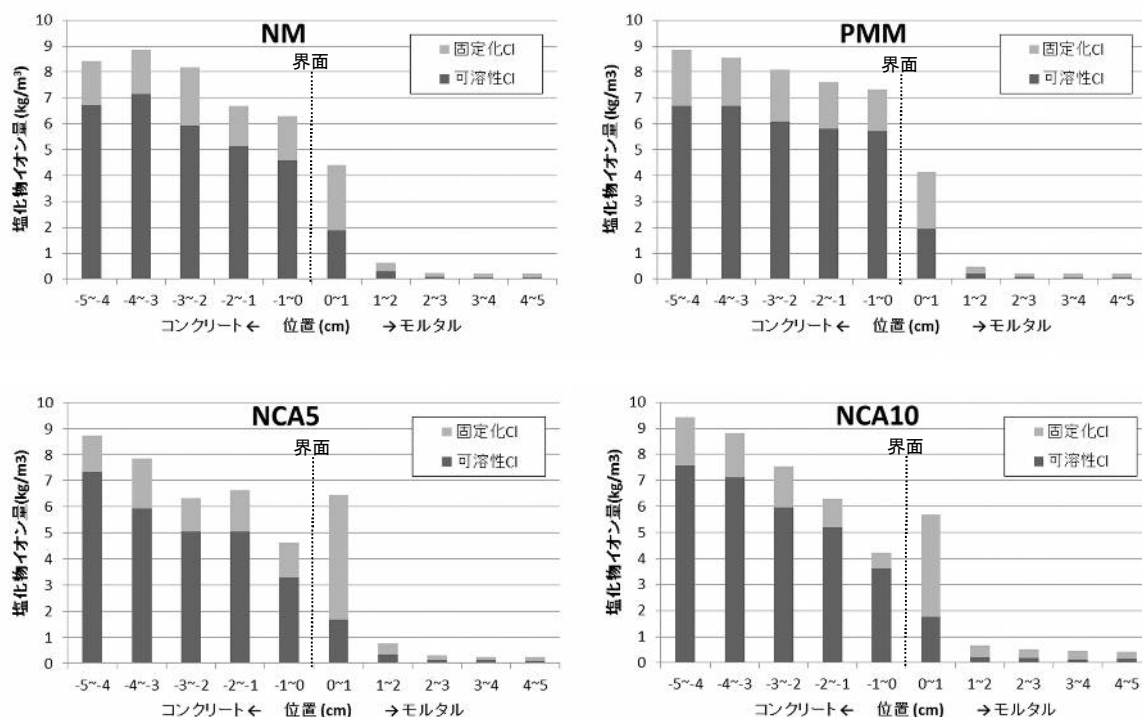


図 3.4.7 (1) 塩化物イオン量

以下、全塩化物イオン量、固定化塩化物イオン量および可溶性塩化物イオン量にわけて考察を行った。

①全塩化物イオンについて

NM および PMM の全塩化物イオンの分布は一般的な濃度勾配による塩化物イオンの拡散状況を示しており、コンクリート側からモルタル側に塩化物イオン量はおおむね階段状の形を示している。

また、PMM は NM に比べて界面での塩化物イオン量の差が大きくなっている。これはポリマーフィルムの形成により、塩化物イオンの移動を抑制したためと考える。

一方、NCA5、NCA10 および PCA5 の全塩化物イオン量の分布は、一般的な濃度勾配による拡散とは異なる塩化物イオン分布形状を示し、界面側（0～1cm）の塩化物イオン量が周囲と比べて突出して大きくなっている。

②固定化塩化物イオンについて

固定化塩化物イオン量は、コンクリート中ではすべての供試体で 1.5 kg/m^3 程度のほぼ同じ量である。2章で示した既往の研究⁴⁾から、普通セメントは質量の0.4%程度までは固定化能力があることが示されており、今回の結果もほぼ同程度であるので、今回試験に供したコンクリートはおおむね 1.5 kg/m^3 の塩化物イオン固定化能力があるものと考えられる。

NM および PMM は界面直近の0～1cmでの固定化塩化物イオン量は $2.0 \sim 2.2 \text{ kg/m}^2$ 程度であり、コンクリート中よりも多い。表3.4.3に示したNMおよびPMMの単位セメント量より、固定化塩化物イオン量はセメントに対して0.3%程度であり、前述の既往の研究の結果とほぼ同じ程度であるので、これは単位セメント量の違いによるものと考えられる。

一方、NCA5、NCA10 および PCA5 の固定化塩化物イオン量は、 $3.7 \sim 4.7 \text{ kg/m}^3$ とコンクリートの3倍、NM および PMM の2倍以上の値を示している。

これはモルタル中の CA_2 により生成した HC による塩化物イオン固定化反応が進行したことによるものと考えられる。コンクリート側の可溶性塩化物イオンは、濃度勾配による拡散でモルタル側に移動する。モルタルに移動した可溶性塩化物イオンは HC による塩化物イオン固定化反応によりフリーデル氏塩として固定化される。NCA5、NCA10 および PCA5 はモルタル硬化体中の HC が多く生成しているため、この塩化物イオン固定化反応が進行し、結果として、NM や PMM と比べて高い塩化物イオン固定化量となったものと考えられる。

③可溶性塩化物イオンについて

可溶性塩化物イオン量は、すべての供試体において、おおむねコンクリート側から階段状の分布状況を示している。このため、可溶性塩化物イオンについては、 CA_2 を混和したモルタル供試体でも濃度勾配による拡散現象が適用できる可能性があると考えられる。

NM および PMM のコンクリート側の界面付近の可溶性塩化物イオン量は、 CA_2 を混和したものに比べて $1 \sim 3 \text{ kg/m}^3$ 高い値となっている。

これは、 CA_2 を混和したモルタル内での塩化物イオンの固定化反応が進行するためと考えられる。つまり、 CA_2 を混和したモルタルの可溶性塩化物イオンは HC の固定化反応により大きく減

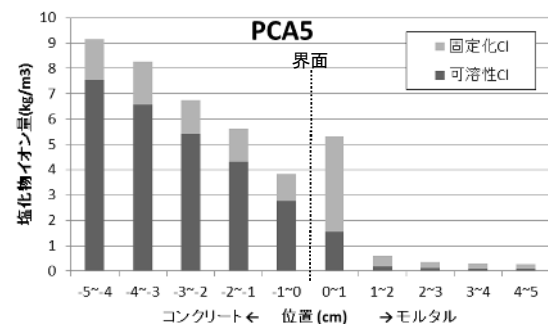


図 3.4.7 (2) 塩化物イオン量

少し、コンクリートとの濃度勾配が大きくなるため、コンクリートからモルタルに移動する可溶性塩化物イオンは増える。したがって、コンクリートの可溶性塩化物イオンは CA_2 を混和しないモルタルよりも CA_2 を混和したモルタルを打ち継いだ時の方が、打継界面付近の可溶性塩化物イオンが減少するものと考えられる。このようにしてコンクリート側の界面付近の可溶性塩化物イオン量が小さくなることから、コンクリート側の鉄筋腐食も抑制されたものとする。

一方、モルタル側の可溶性塩化物イオン量は、 CA_2 を混和したものの方が若干量は小さくなるが、 CA_2 の混和の有無により、あまり差は見られない結果となった。鉄筋腐食量の結果では CA_2 を混和したモルタル内部の鉄筋は全く腐食が見られない結果となっており傾向が異なる。これは HC の固定化反応により、鉄筋腐食に関わる可溶性塩化物イオン量を低減するとともに、HC の塩化物イオン固定化反応は、既往の研究²⁾ で示したように、イオン交換反応により OH^- イオンが放出されるため、 CA_2 を混和したモルタルの内部では、 CA_2 を混和しないモルタルの内部と比べてほぼ同じ程度の可溶性塩化物イオン量でも、 $[Cl^-] / [OH^-]$ イオン比が小さくなり、鉄筋腐食が起こりにくい状態となっている可能性が考えられる。

(5) 粉末 X 線回折

粉末 X 線回折の測定結果を図 3.4.8 に示す。なお、図は 2θ で $5 \sim 20^\circ$ の範囲内で示している。図中、★がハイドロカルマイト、☆がフリーデル氏塩、●が水酸化カルシウムのピークを示す。

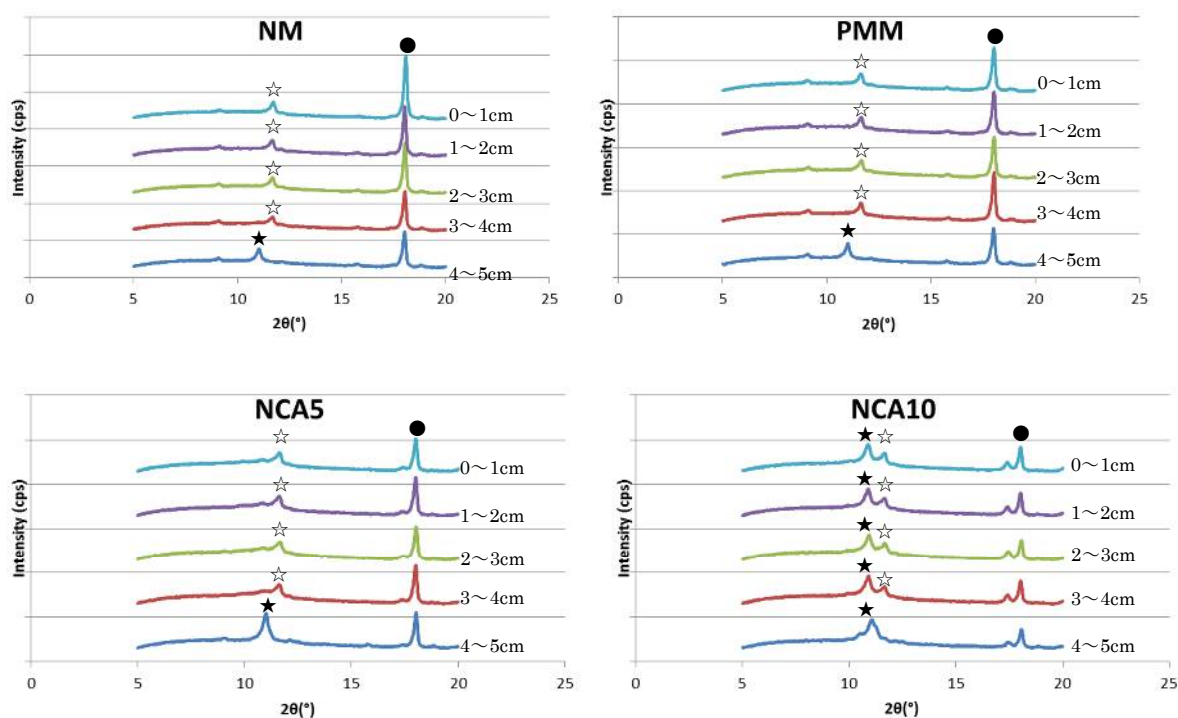


図 3.4.8 (1) 粉末 X 線回折

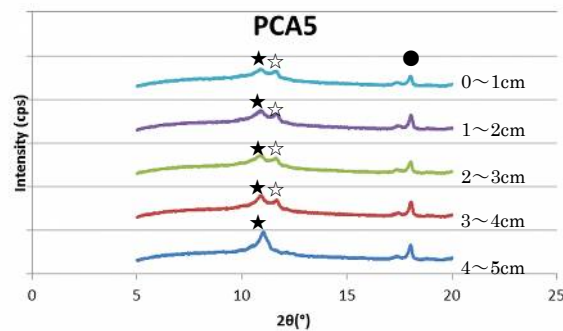


図 3.4.8 (2) 粉末 X 線回折

図 3.4.8 より、NM と PMM は界面から 4cm まで (3-4cm) は、HC のピークは見られず、フリーデル氏塩のピークのみ見られた。4-5cm では HC が見られており、NM と PMM でも HC が可溶性塩化物イオンを取り込んで、フリーデル氏塩になる反応が進行していることを確認した。

HC は 2 章で示したように、カルシウムアルミネート系の水和物であるので、CaO および Al_2O_3 を硬化体中に有する普通ポルトランドセメント中でも少量ながら生成する⁸⁾。

一方、NCA10 と PCA5 は界面から 4cm まで (3-4cm) までは、HC とフリーデル氏塩が共存している。4-5cm では、HC のピークのみとなっていることから、HC からフリーデル氏塩になる反応が進行しているが、その HC はまだ残存しており、塩化物イオンの固定化能力に余力を残していることがわかる。NCA5 は界面から 4cm まで (3-4cm) HC のピークは見られず、フリーデル氏塩のみが見られた。界面から 4cm までほぼ全量の HC が可溶性塩化物イオンの固定化反応でフリーデル氏塩となったものと考えられる。

(6) EPMA

EPMA の測定結果を図 3.4.9 に示す。なお、EPMA マッピング中に記載の濃度とは、測定対象となる微小領域における構成元素数の濃度（比率）であり、質量割合の濃度とは異なる。本項における濃度は特に断りのない限り、この構成元素数の比率に基づく濃度を示すものとする。

NM と PMM はコンクリートからモルタルに可溶性塩化物イオンが浸透し、図 3.4.6 と同じようにコンクリートから塩化物イオンが拡散している状況が認められる。ここで、モルタル側への塩化物イオン浸透深さは、両方の供試体とも 0.8% 程度の濃度がほぼ同じ 6~7mm 程度の深さまで認められた。これは、図 3.4.5 のモルタル側に見られた鉄筋腐食範囲とおおむね一致する。

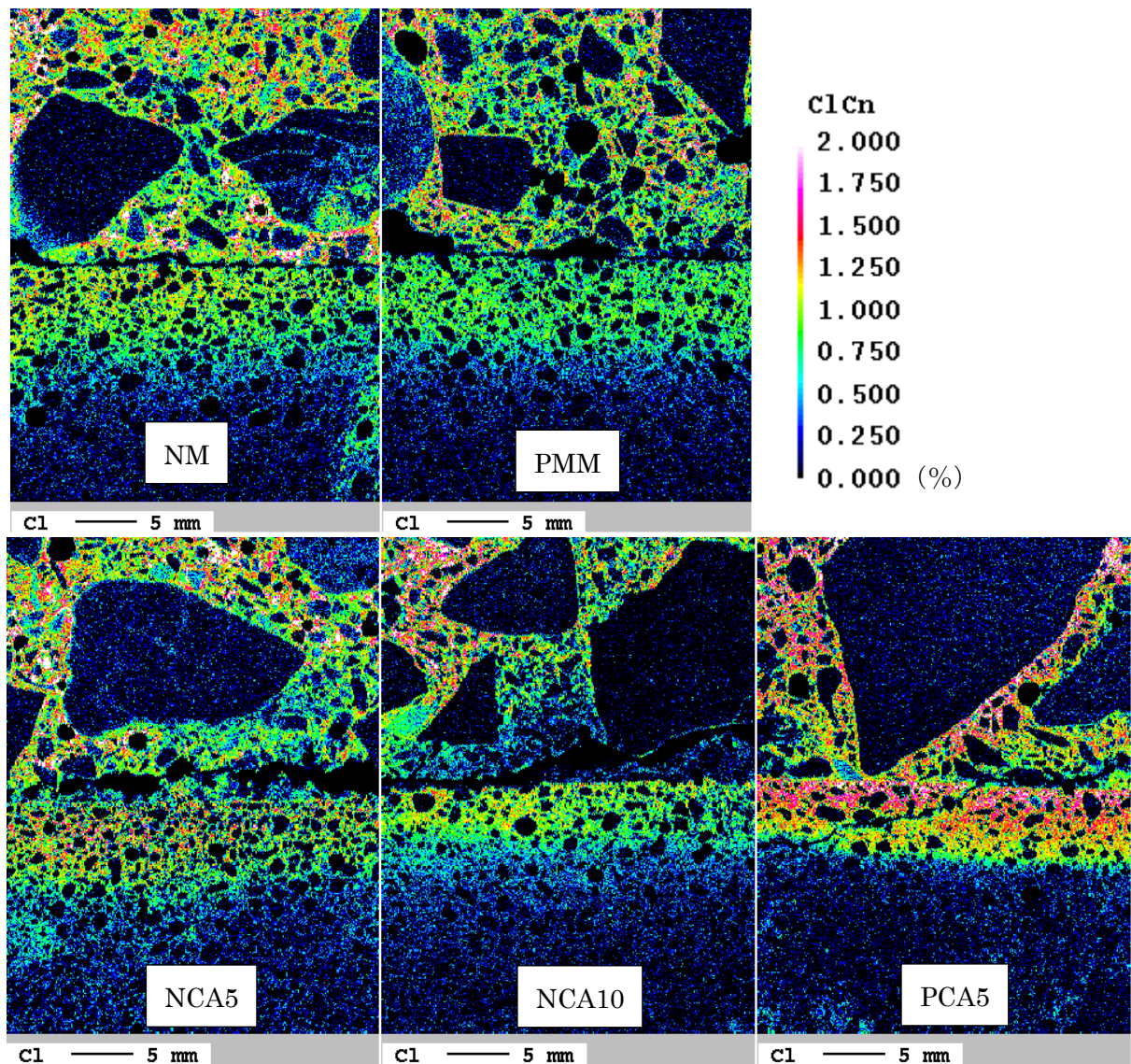


図 3.4.9 EPMA

一方、NCA5 も図 3.4.5 と同様の分布が認められた。特に界面からコンクリート側へ 3mm ほど、0.8~1.0%の濃度を示す周囲より塩化物イオン量が、0.2~0.5%に小さくなっている領域が認められた。これは、図 3.4.5 のコンクリート側の鉄筋腐食が見られない範囲とも一致する。なお、モルタル側にも NM と同様に塩化物イオンの浸透が 6~7mm 程度みられ、しかも濃度の最大値は 1.3~1.5%程度と NM よりも 1.5 倍程度大きくなっているが、可溶性塩化物イオンの固定化により、図 3.4.7 に示したように、鉄筋腐食に関わる可溶性塩化物イオン量が NM よりも少なくなっているため、モルタル側の鉄筋では腐食が見られないものと考えられる。

NCA10 では、NCA5 よりもさらに塩化物イオン濃度 0.5%以下の濃度が小さい層がおおよそ 7~8mm の範囲まで増大しており、これも図 3.4.5 のコンクリート側の鉄筋腐食が見られない範囲とほぼ一致する。さらにモルタル側への塩化物イオンの浸入深さも NM や NCA5 に比べて小さくなっている。但し、濃度の最大値は 1.0~1.2%程度と大きくなっているが、NCA5 と同様に可溶性塩化物イオン量は少なくなっており、鉄筋腐食が抑制されているものと考えられる。

NCA10 では、NCA5 と比べ、HC の生成量が多く、モルタル側の可溶性塩化物イオンの固定化

反応が進むため、コンクリート側の可溶性塩化物イオン量が減少する効果が高くなる。一方、モルタル側に塩化物イオンが集積することになるが、可溶性塩化物イオンの固定化反応が進むため、界面付近のモルタル側の可溶性塩化物イオン量は図 3.4.7 のようにかえって NM よりも少なくなっている。加えて、盛岡ら²⁾の報告のように、固定化反応はモルタル組織の緻密化も促すため、モルタル側への塩化物イオンの浸透は N や NCA5 よりも小さくなる結果となったものと考えられる。

PCA5 でも、コンクリート側に 2~3mm 程度塩化物イオン濃度 0.5%以下の塩化物イオン量が小さい領域が見られ、図 3.4.5 の鉄筋腐食が見られない領域とほぼ一致する。PMM に比べて塩化物イオンがモルタル側に浸透する深さが明らかに小さくなっている。一方、モルタル側の塩化物イオン濃度の最大値は、1.5~1.7%程度と大きくなっているが、NCA5 および NCA10 と同様に可溶性塩化物イオン量は少なくなっており、鉄筋腐食は抑制されると考えられる。

3.4.4 本節のまとめ

(1) 塩素固定化材を混和したセメントモルタルと塩化物イオンを混和したコンクリートを打ち継いだ場合、塩化物イオンを含むコンクリート側の鉄筋の腐食を抑制する効果があることが示唆された。

(2) 塩化物イオンを混和したコンクリートと塩素固定化材を混和しないモルタルを打ち継いだ場合、打継ぎ界面付近の塩化物イオンは、濃度勾配による拡散により、コンクリートからモルタル側に塩化物イオンが移動する。

(3) 塩化物イオンを混和したコンクリートと塩素固定化材を混和したモルタルを打ち継いだ場合、界面付近の可溶性塩化物イオンは、コンクリートからモルタル側に塩素固定化材を混和しないモルタルを打ち継いだ場合よりも多く移動し、界面付近のコンクリート側の可溶性塩化物イオンは塩素固定化材を混和しないモルタルを打ち継いだ場合よりも減少する。また、界面付近のモルタル側の固定化塩化物イオンが卓越して増加する。これは、 CA_2 から生成した HC が可溶性塩化物イオンを固定化するためと考えられる。

3.5 塩化物イオンを混和したコンクリートと塩素固定化材を混和した断面修復材を打ち継いだ時の塩化物イオン拡散挙動の解析的検討

3.5.1 はじめに

コンクリート中の塩化物イオンの移動は、一般に *Fick* の法則に基づく拡散方程式で表現され、目的に応じた境界条件の設定により、様々な算定方法が提案^{例えば 6)}されている。

塩化物イオンを混和したコンクリートに、塩素固定化材の CA_2 を使用したモルタルを打ち継ぎ、塩化物イオン量の経時変化を実験的に検証した 3.4 節の実験結果を元に、 CA_2 による塩化物イオンの固定化条件について、*Fick* の法則を適用して解析的に検討した。また、提案した解析モデルを用いて、劣化したコンクリート構造物に CA_2 を使用した断面修復工法を適用した場合の効果についてケーススタディを実施した。

3.5.2 塩化物イオンの固定化を考慮した解析モデル

(1) 実験結果の解釈

以下に 3.4 節で示した実験結果を示す。

図 3.5.1 に示すように塩化物イオンを 10kg/m^3 混和した既設コンクリートに、 CA_2 を混和したモルタルを打ち継ぎ、打ち継ぎ後からの材齢 642 日で、供試体を 1cm 毎にスライスして、可溶性の塩化物イオン量、固定化された塩化物イオン量を測定した。表 3.5.1 に既設部および打継部の配合を示す。

塩化物イオン量の測定結果を図 3.5.2 に示す。NM が CA_2 を未使用の普通モルタル、PMM が CA_2 を未使用のポリマーセメントモルタル NCA5 および NCA10 が、それぞれ CA_2 をセメントに対して 5%、10% 質量置換した普通モルタルを打ち継いだ場合、PCA5 が CA_2 をセメントに対して 5% 質量置換したポリマーセメントモルタルを打ち継いだ場合である。いずれもモルタル部における打継ぎの界面近傍では、既設のコンクリート部分よりも固定化された塩化物イオン量が多い。特に CA_2 を使用したものは、固定化された塩化物イオン量がさらに大きくなっているのが特徴的である。この実験結果から、 CA_2 を使用した場合の塩化物イオンの移動／拡散には、以下の現象が生じていると推察される。

- ① 移動する可溶性塩化物イオンの濃度勾配が、*Fick* の法則における拡散の駆動力である。言い換えれば、固定化された塩化物イオン量は、濃度拡散に寄与しない。
- ② CA_2 の有無に関わらず、モルタルの界面近傍では、既設部に比べて固定化された塩化物イオン量が多い。すなわち、普通セメントのみを用いたモルタルにおいても塩化物イオンを固定化する能力を持つ。
- ③ 既設のコンクリート部と、 CA_2 を使用していないモルタルとに着目した場合、塩化物イオンの固定化量は、コンクリートに比べてモルタルが大きい。すなわち、モルタルは、コンクリートに比べて単位セメント量が多く、塩化物イオンの固定化量は、単位セメント量に関連することが推察できる。
- ④ CA_2 を使用したモルタルは、さらに塩化物イオンの固定化の能力が大きいことから、 CA_2 特有の塩化物イオン固定化量が存在する。
- ⑤ ②、③および④から、塩化物イオンの固定化は単位セメント量や CA_2 の単位量に関連する。

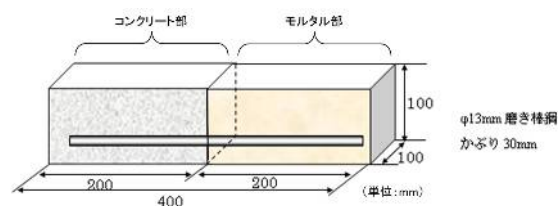


図 3.5.1 作製供試体の概要

表 3.5.1 使用した材料のセメントおよび CA_2 の単位量

	単位量 (kg/m^3)	
	C	CA_2
コンクリート	298	0
普通モルタル (NM)	630	0
ポリマーセメントモルタル (PMM)	630	0
CA_2 5%混和モルタル (NCA5)	598.5	31.5
CA_2 10%混和モルタルモルタル (NCA10)	567	63
CA_2 5%混和ポリマーセメントモルタル (PCA5)	598.5	31.5

これらの特徴から、可溶性の塩化物イオンの拡散は *Fick* の法則に支配され、塩化物イオンの固定化の能力は、材料に起因するものと考えることができる。

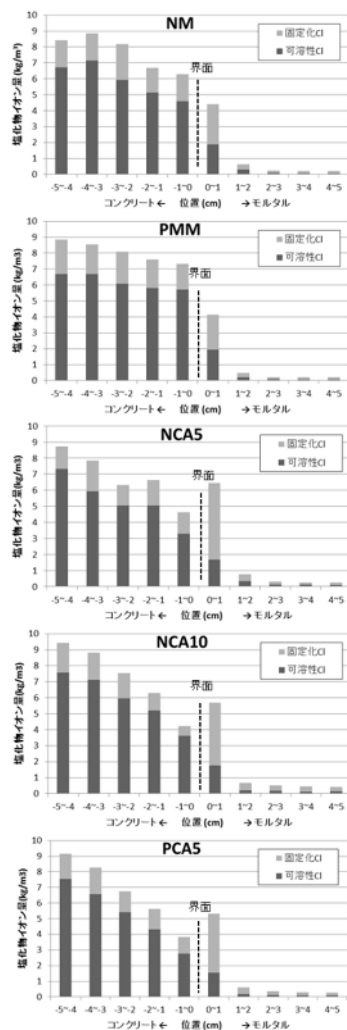
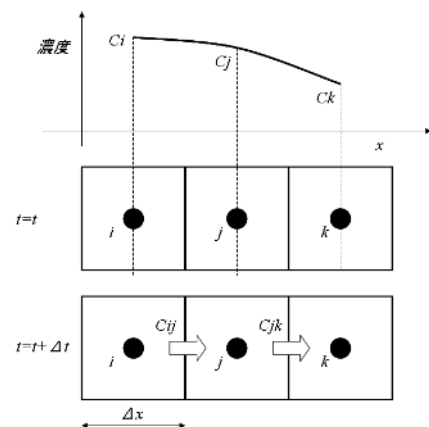
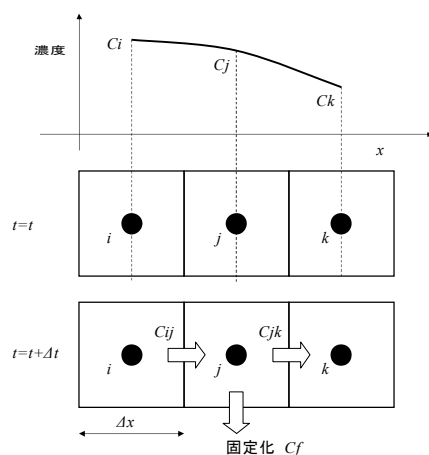


図 3.5.2 塩化物イオン量測定結果



a) 濃度拡散の概念図



b) 濃度拡散における固定化の概念図

図 3.5.3 濃度拡散の概念

(2) 支配方程式

一般に濃度拡散は、*Fick* の第 2 法則が適用できる。「拡散流束は濃度勾配に比例する」とした *Fick* の第 1 法則を拡張したもので、1 次元の場合を例示すると、式 (3.5.1) で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{式 (3.5.1)}$$

ここに、 t : 時間

C : 濃度 (kg/m^3)

x : 位置 (m)

λ : 拡散係数 (m^2/s)

CA₂による塩化物イオンの固定化条件を *Fick* の法則に適用する場合、次の仮定を導入する。

(仮定 1) 可溶性の塩化物イオン濃度 (量) は、拡散係数を用いた *Fick* の法則に従う。

(仮定 2) 固定化された塩化物イオン濃度 (量) は、拡散の駆動力として作用しない。

(仮定 3) 固定化される塩化物イオン濃度 (量) は、対象となる微小要素中に存在する可溶性の塩化物イオン濃度 (量) から一定の割合が固定化されるものとする。ただし、材料に起因する固定化の能力の限界を超えて固定化しない。

(仮定 4) 一度、固定化された塩化物イオンは、再び可溶しない。

一次元の場合を例に概念図を図 3.5.3 a) に示す。微小断面積 ΔA の流管を微小間隔 Δx に分割した微小要素 (以下、セルと称す) を考えれば、式 (3.5.1) の左辺は式 (3.5.2) で、右辺は式 (3.5.3) で示される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_{j,t+\Delta t} - C_{j,t}}{\Delta t} \quad \text{式 (3.5.2)}$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) = \lambda \left(\frac{C_{k,t} - C_{j,t}}{\Delta x} - \frac{C_{j,t} - C_{i,t}}{\Delta x} \right) / \Delta x = \lambda \frac{C_{k,t} + C_{i,t} - 2C_{j,t}}{\Delta x^2} \quad \text{式 (3.5.3)}$$

これらを式 (3.5.1) に代入して整理したものが式 (3.5.4) となる。これを対象とするすべてのセルに適用することで、数値解析することができる。

$$C_{j,t+\Delta t} = \lambda \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (C_{k,t} + C_{i,t} - 2C_{j,t}) + C_{j,t} \quad \text{式 (3.5.4)}$$

さて、 CA_2 による固定化の条件は、(仮定 2) を導入して、式 (3.5.3) において固定化される塩化物イオン濃度 (量) を差し引けばよい。すなわち、図 3.5.3 b) の概念図に示すように、式 (3.5.3) は式 (3.5.5) で定義できる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 C}{\partial t^2} &= \lambda \left(\frac{C_{k,t} - C_{j,t} - C_{f,jk}}{\Delta x} - \frac{C_{j,t} - C_{i,t} - C_{f,ij}}{\Delta x} \right) / \Delta x \\ &= \lambda \frac{C_{k,t} + C_{i,t} - 2C_{j,t} - (C_{f,jk} - C_{f,ij})}{\Delta x^2} \end{aligned} \quad \text{式 (3.5.5)}$$

同様に、式 (3.5.6) を得る。

$$C_{j,t+\Delta t} = \lambda \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (C_{k,t} + C_{i,t} - 2C_{j,t} - C_{f,jk} + C_{f,ij}) + C_{j,t} \quad \text{式 (3.5.6)}$$

ここに、 C_f : 固定化される塩化物イオン濃度 (量) (kg/m^3) である。

固定化される塩化物イオン濃度 (量) C_f について、以下、パラメータスタディを元に解析的に検討する。

(3) 境界条件とパラメータスタディ

前節の解析モデルの適用性と境界条件を決定するため、塩化物イオンを混和したコンクリートに、 CA_2 を使用していない普通モルタルを打ち継いだ場合の実験結果 (NCA5 および NCA10) を例に、各セルで固定化できる塩化物イオン量を (仮定 3) に基づいて可溶性の塩化物イオン量の n 割、各セルで固定化できる塩化物イオン量の上限値を $m \text{ kg/m}^3$ として、パラメータスタディを行った。なお、解析モデルは、 Δx を 1mm として算定し、実験結果と併せるために 10mm 間

隔の平均値として整理した。また、初期条件として、表 3.5.2 に示す物性値を用いた。なお、ケーススタディの検討水準について表 3.5.3 にまとめた。

表 3.5.2 パラメータスタディの解析条件

項目		既設コンクリート	打継ぎのモルタル	備考
(初期条件)				
初期塩化物イオン量 (kg/m ³)	固定化	1.5	0.0	
	可溶性	8.5	0.0	
見かけの拡散係数 (m ² /年)		2.0	0.5	
(固定化条件)				
固定化の上限値 (kg/m ³)		m	m	検討パラメータ
固定化の割合		n	n	検討パラメータ

表 3.5.2 パラメータスタディにおける検討項目

検討ケース	検討条件	検討項目
Case1	既設部と打継部が同じ設定の場合 (固定化の能力：既設部＝打継部)	固定化の上限値
Case2		固定化の割合
Case3	既設部と打継部が異なる設定の場合 (固定化の能力：既設部＜打継部)	固定化の上限値
Case4		固定化の割合

a) Case1 固定化の上限値の検討

各セルの可溶性の塩化物イオン量に対する固定化の割合 n を 0.2 と固定し、各セルの塩化物イオン量の固定化の上限値 m kg/m³ についてパラメータスタディを行った。結果の一例を図 3.5.4 に示す。

固定化の上限値を 0.0kg/m³ と設定した場合、任意のセルにおいて塩化物イオンが固定化されない結果を得た。また、固定化の上限値を 4.0kg/m³ と大きく設定した場合には、必要以上に固定化される塩化物イオン量が増加する結果となった。このことから、各材料および配合において、塩化物イオンの固定化の上限値が存在し、重要なパラメータの一つとなることが確認できる。

b) Case2 固定化の割合の検討

各セルの塩化物イオン量の固定化の上限値 m を 1.5kg/m³ と固定し、各セルの可溶性の塩化物イオン量に対する固定化の割合 n についてパラメータスタディを行った。結果の一例を図 3.5.5 に示す。

固定化の割合 n を設定することで、次の検査対象となるセルにおいて、固定化された塩化物イオン量はその割合に応じて増加する結果を得た。固定化の割合 n は、塩化物イオンの固定化を再現するもう一つの重要なパラメータであることが確認できる。

c) Case3 打継部の固定化の上限値

打継部の塩化物イオン量の固定化の割合 n を 0.2 と固定し、固定化の上限値 m についてパラメータスタディを行った。なお、既設部は、固定化の割合 n が 0.2、固定化の上限値 m が 1.5kg/m^3 とした。結果の一例を図 3.5.6 に示す。

打継部の固定化の上限値 m を 8.0kg/m^3 と高めに設定した Case 3-3 は、次のセルにおける塩化物イオン量の固定化の程度が、固定化の上限値 m を 4.0kg/m^3 と設定した Case 3-2 と大きく変わっていない。固定化の割合が 0.2 程度であるため、有意な拡散が生じない結果であり、固定化の上限値 m の設定が有効に作用していることが確認できる。

d) Case4 打継部の固定化の割合

打継部の塩化物イオン量の固定化の上限値 m を 8.0kg/m^3 と固定し、固定化の割合 n についてパラメータスタディを行った。なお、既設部は、固定化の割合 n が 0.2、固定化の上限値 m が 1.5kg/m^3 とした。結果の一例を図 3.5.7 に示す。

打継部の固定化の上限値 m を 8.0kg/m^3 と高めに設定した場合、固定化の割合が 0.2 とした Case 4-1 では、次のセルにおける固定化された塩化物イオン量が大きく変化していない。すなわち、その上限値を満たすだけの拡散は生じないことが再現されている。一方、固定化の割合を大きくした Case 4-2 や Case 4-3 では、固定化される塩化物イオン量が増え、塩化物イオンが拡散し、固定化されている状態を再現することができた。

これらの一連のパラメータスタディの結果から、 CA_2 の使用による塩化物イオンの拡散と固定化の解析モデルには、*Fick* の法則に基づく拡散方程式に、使用材料や配合に起因する塩化物イオンの固定化の割合 n と固定化の上限値 m を境界条件として設定することで、実験値を再現できることが示唆された。

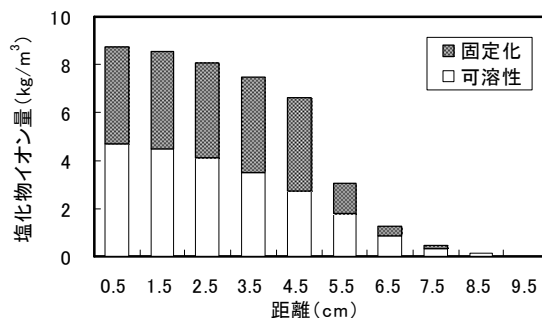
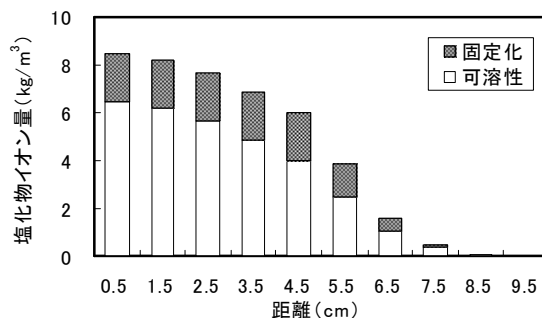
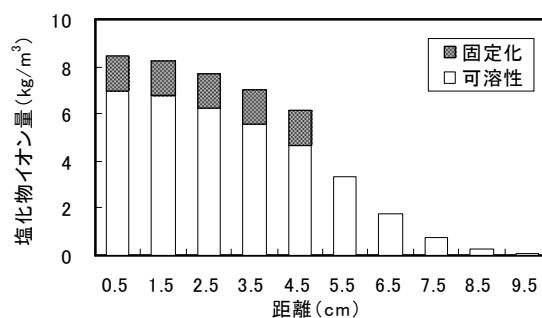
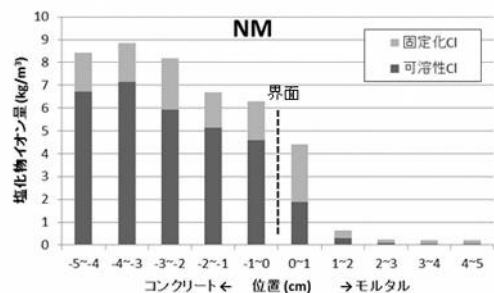
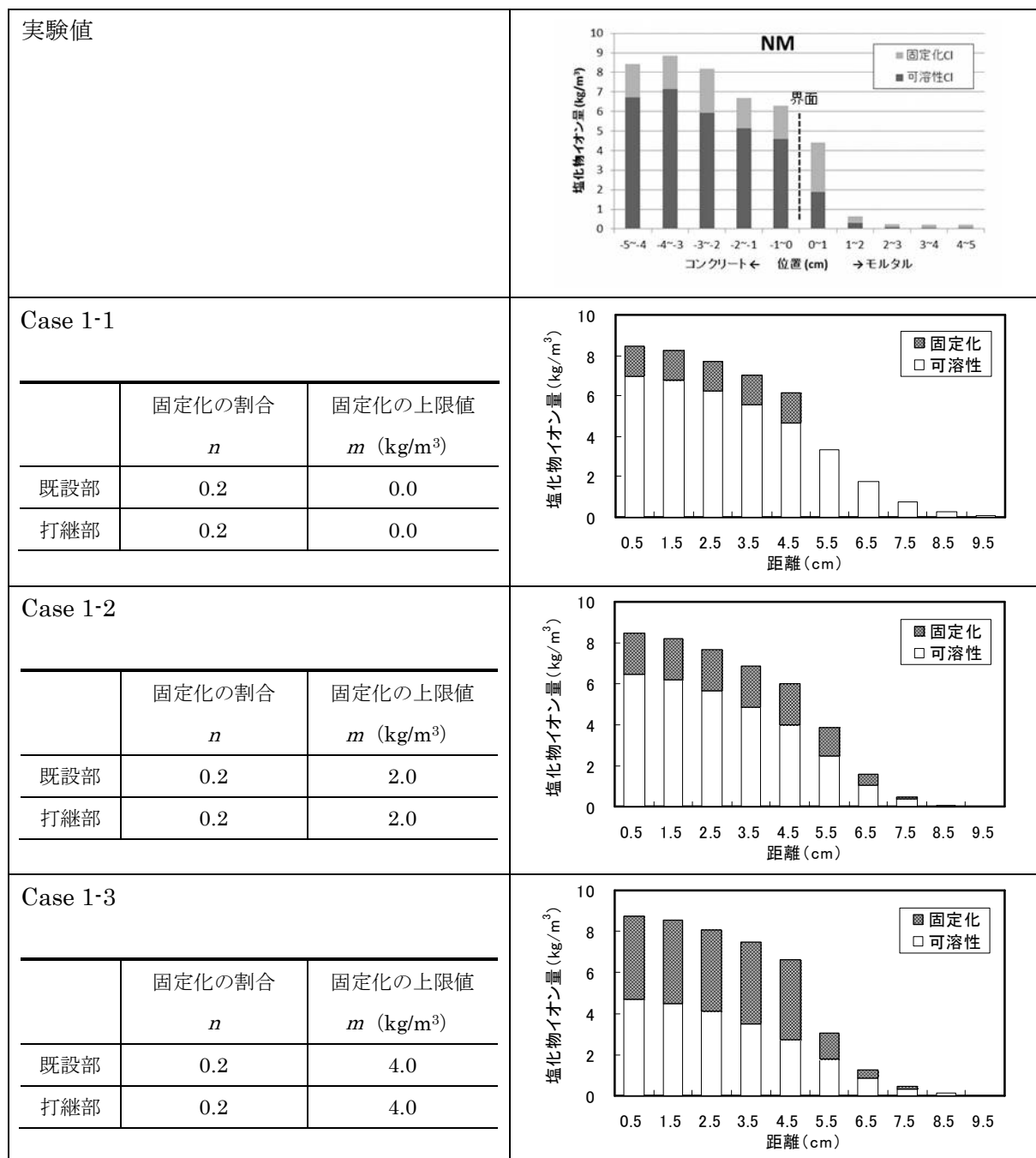


図 3.5.4 パラメータスタディ (Case1 : 固定化の上限値の検討)

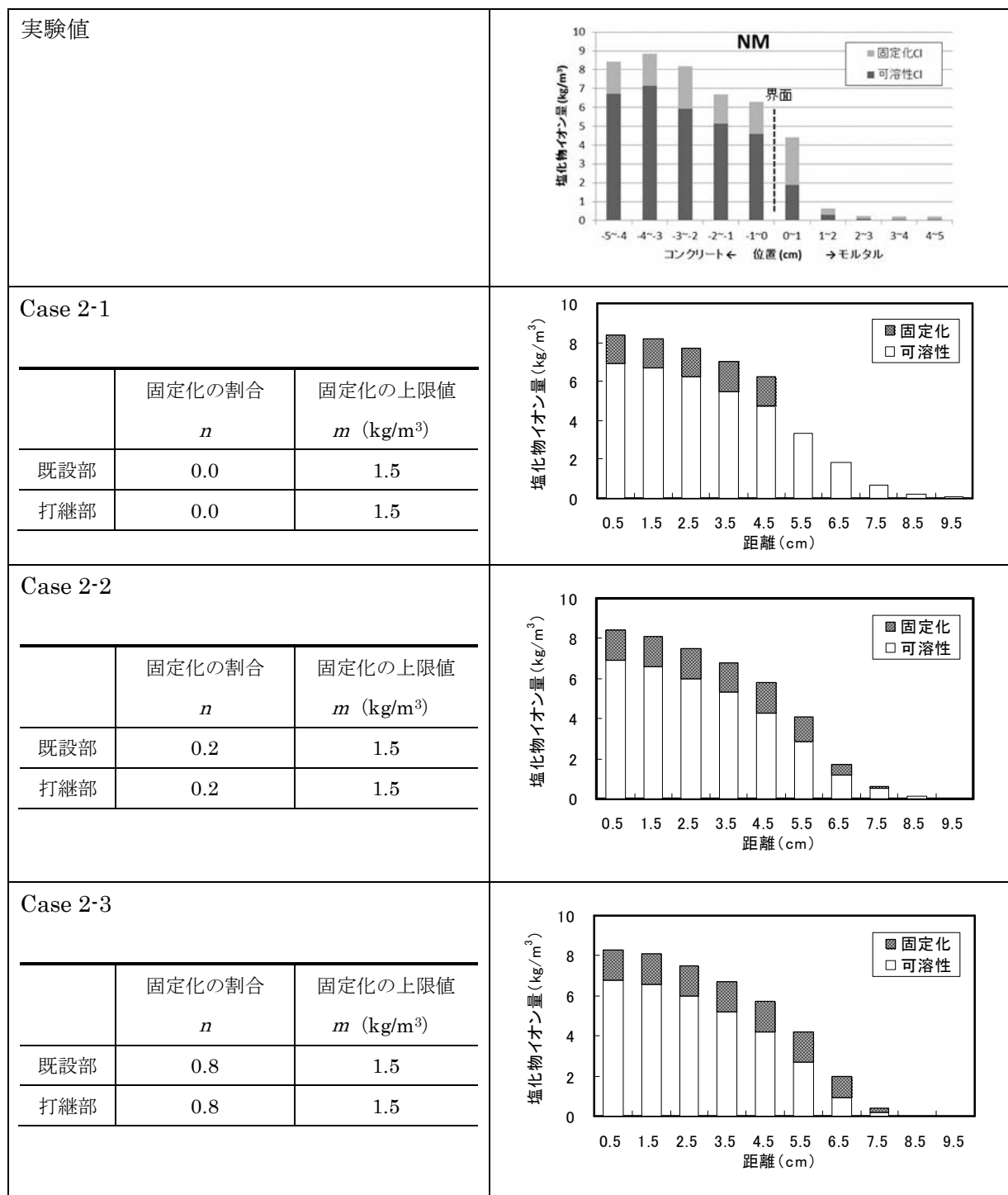


図 3.5.5 パラメータスタディ (Case2 : 固定化の割合の検討)

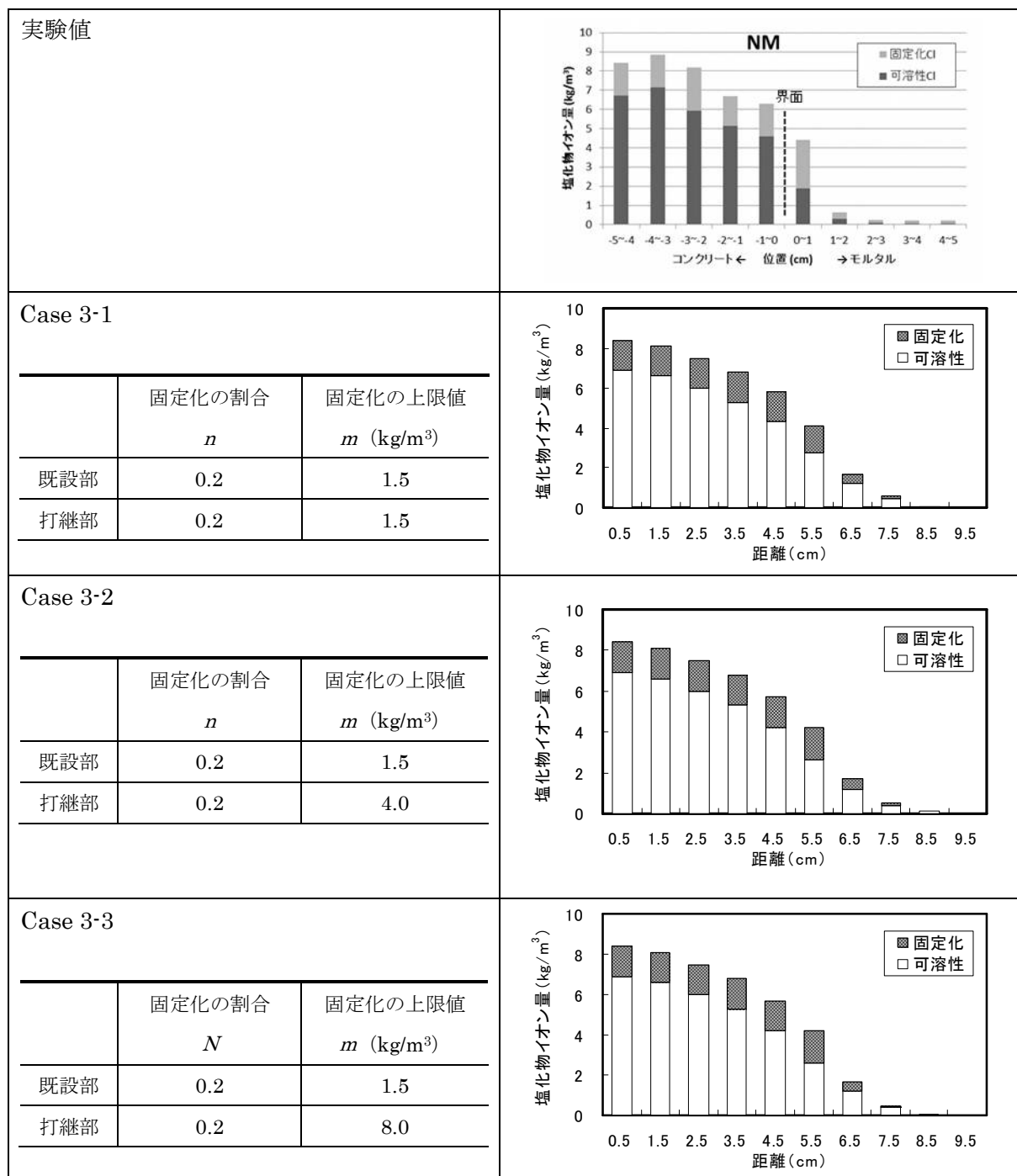


図 3.5.6 パラメータスタディ (Case3 : 打継部の固定化量の上限値の検討)

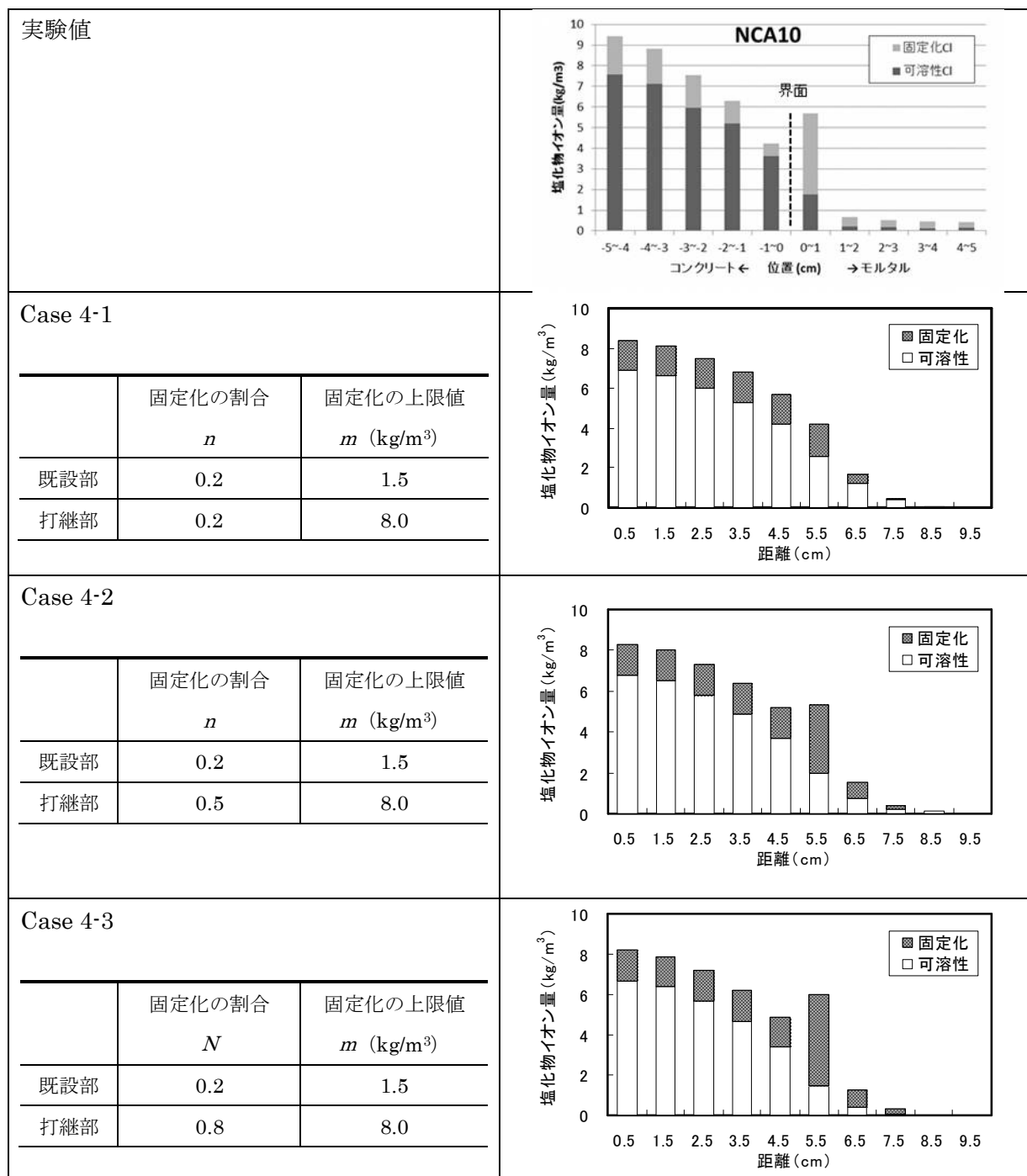


図 3.5.7 パラメータスタディ (Case4 : 打継部の固定化の割合の検討)

3.5.3 固定化の割合と上限値

(1) はじめに

前述の実験結果およびパラメータスタディから、塩化物イオンの固定化の上限値や固定化の割合は、材料および配合に支配される可能性が高いことが示唆された。

図 3.5.8 は、全塩化物イオン量に対する固定化された塩化物イオン量の割合を、全塩化物イオン量で整理したものである。図より、塩化物イオンの固定化の割合は、塩化物イオン量の絶対量との関連はなく、ほぼ一定の範囲をとることから、むしろ、材料や配合に起因していることが確認できる。

図 3.5.9 は、既設のコンクリートおよび打継部のモルタルの固定化された塩化物イオン量の最大値を整理したものである。概ねこの値を固定化の上限値としてみることができる。

これらの実験結果を元に、前節の解析モデルにおける塩化物イオンの固定化の上限値 $m \text{ kg/m}^3$ および固定化の割合 n について、単位セメント量および CA_2 の単位量の関数とした簡単なモデル化を検討した。

(2) セメントの塩化物イオンの固定化能力

表 3.5.4 は、図 3.5.8 および図 3.5.9 の実験結果を整理したものである。なお、塩化物イオンの固定化の割合は、全塩化物イオン量に対する固定化された塩化物イオン量の割合で、図 3.5.8 の各値から、その最大値、最小値および平均値で整理した。また、固定化の上限値は、図 3.5.9 で示した固定化の最大値を整理した。

セメントの塩化物イオンの固定化の能力について述べる。表 3.5.4 より、配合 O と配合 A は、 CA_2 を使用していない。したがって、これら 2 つの配合から、セメントの固定化能力を推定することができる。これらの固定化の能力は、単位セメント量の関数としてモデル化が可能である。

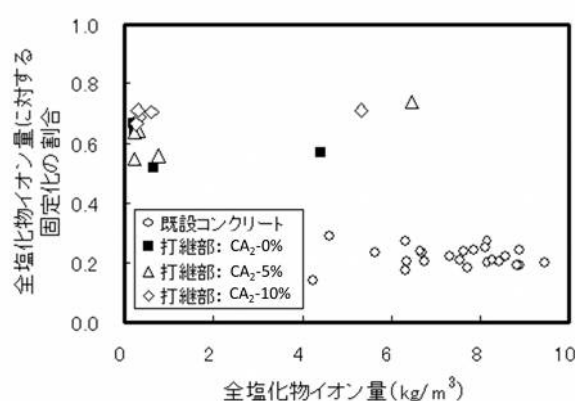


図 3.5.8 全塩化物イオン量と塩化物イオンの固定化の割合

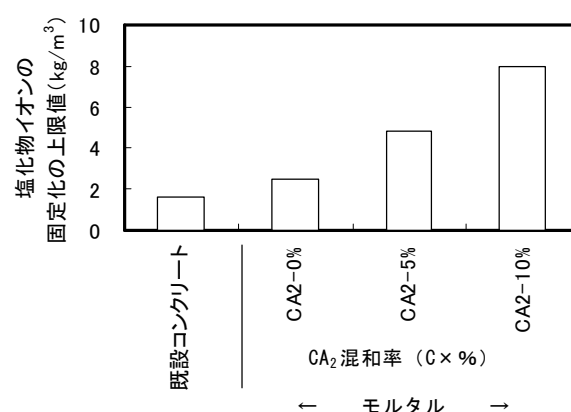


図 3.5.9 固定化塩化物イオン量の最大値

表 3.5.4 単位量と固定化の割合および固定化の上限值

配合名		単位量 (kg/m ³)		塩化物イオンの固定化の割合			固定化の 上限値 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)
		C	CA ₂	最小	最大	平均		
Con	既設部	298	0	0.14	0.29	0.22	1.6	28.8
NM	打継部	630	0	0.51	0.67	0.61	2.5	
NCA5	打継部	590	31	0.54	0.74	0.62	4.8	
NCA10	打継部	560	62	0.65	0.75	0.71	8.0	

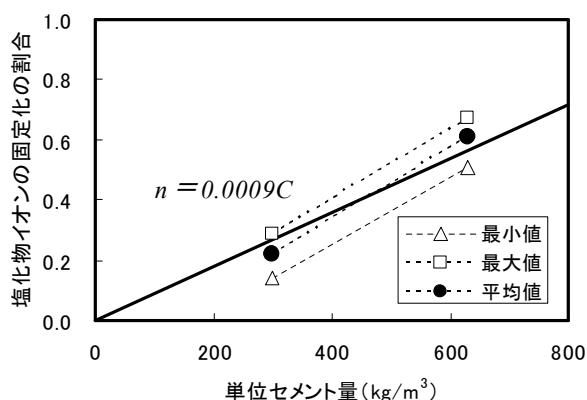
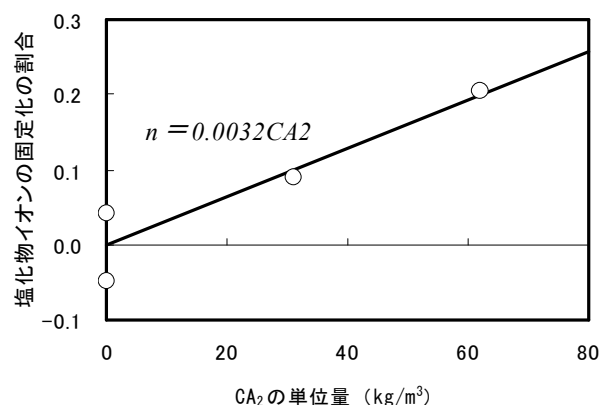
図 3.5.10 塩化物イオンの固定化の割合と
単位セメント量の関係図 3.5.11 塩化物イオンの固定化の割合と
CA₂の単位量の関係

表 3.5.5 単位量と固定化の割合および固定化の上限值

配合		単位量 (kg/m ³)		固定化の割合 (平均値) (I)	セメントに起因する 固定化の割合 0.0009C (II)	差 ((I) - (II))
		C	CA ₂			
Con	既設部	298	0	0.22	0.27	-0.05 → 0
NM	打継部	630	0	0.61	0.57	0.04 → 0
NCA5	打継部	590	31	0.62	0.53	0.09
NCA10	打継部	560	62	0.71	0.50	0.21

図 3.5.10 は、既設コンクリート部と打継部 NM における単位セメント量と塩化物イオンの固定化の割合を整理したもので、最大値、最小値および平均値を併記している。

固定化の割合は、セメント水和物の量と比例していると仮定すれば、この関係は線形となるものと予想され、最小二乗法により近似をした場合、式(3.5.7)を得る。なお、測定点数が少ないため、今回は線形近似を採用するが、今後、測定点数を増加させ、より工学的な意味を持たせる必要がある。

$$n = 0.0009C$$

$$\text{式(3.5.7)}$$

(3) CA₂の塩化物イオンの固定化能力

表 3.5.4 に示した打継部 NCA5 および NCA10 のモルタルは、CA₂を使用している。これら 2 つの配合から、式 (3.5.7) より求まるセメントに起因する固定化分を求め、実測値からこれを差し引き、CA₂の寄与分を抽出した。算出結果を表 3.5.5 に示す（表中の「差」の列）。

図 3.5.11 は、表 3.5.5 を図化したもので、CA₂による塩化物イオンの固定化の割合と CA₂の単位量の関係である。CA₂の単位量が 0kg/m³ のとき、CA₂による塩化物イオンの固定化の割合は零となる境界条件を導入すれば、この関係は切片が零の線形近似となり、式 (3.5.8) を得る。

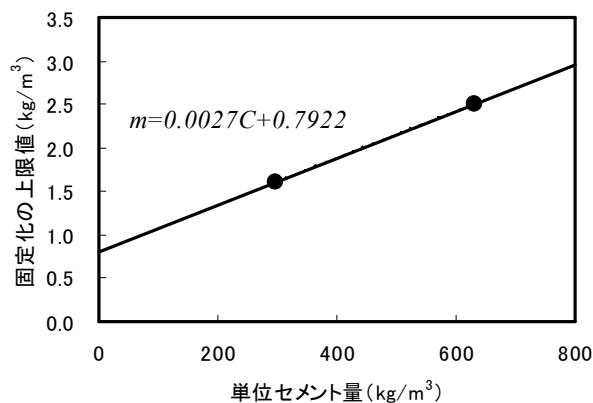


図 3.5.12 塩化物イオンの固定化の上限値と単位セメント量の関係

$$n = 0.0032CA_2$$

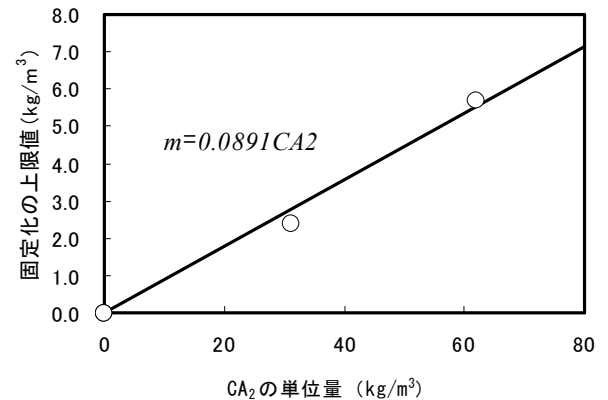


図 3.5.13 塩化物イオンの固定化の上限値と CA₂の単位量の関係

$$\text{式 (3.5.8)}$$

CA₂を使用したコンクリートおよびモルタルの塩化物イオンの固定化の割合 n は、式 (3.5.7) と式 (3.5.8) を組み合わせた式 (3.5.9) でモデル化できる。

$$n = 0.0009C + 0.0032CA_2 \quad \text{式 (3.5.9)}$$

また、これらの関係式から、セメントおよび CA₂が 1kg/m³のときの塩化物イオンの固定化の割合は、それぞれ、0.0009 と 0.0032 となり、CA₂の塩化物イオンの固定化の割合は、普通ポルトランドセメントの 3.5 倍程度となる。

(4) CA₂を使用したコンクリートの塩化物イオンの固定化の上限値

塩化物イオンの固定化の割合の場合と同様の方法で、塩化物イオンの固定化の上限値について整理した。

図 3.5.12 に既設コンクリート部および打継部 NM から求まる単位セメント量と固定化の上限値の関係を示す。単位セメント量と固定化の上限値の関係は、検討対象となるデータ数が 2 点と少なく、切片が零では十分な近似が行えないため、実際には零点を通る非線形の関係となると考

えられるが、本研究では式(3.5.10)に示すような検討データの2点を通る切片を有する線形近似とした。

$$m = 0.0027C + 0.7922 \quad \text{式(3.5.10)}$$

図3.5.13に配合Bおよび配合Cを組み合わせで抽出したCA₂の単位量と固定化の上限値を示す。CA₂の単位量と固定化の上限値の関係は、切片が零の線形近似が可能であった。式(3.5.11)に示す。

$$m = 0.0891CA_2 \quad \text{式(3.5.11)}$$

CA₂を使用したコンクリートおよびモルタルの塩化物イオンの固定化の上限値 m は、式(3.5.10)と式(3.5.11)を組み合わせで式(3.5.12)でモデル化できる。

$$m = 0.0027C + 0.0891CA_2 + 0.792 \quad \text{式(3.5.12)}$$

式(3.5.10)は切片を有するため単純な比較はできないが、単位セメント量が300～600kg/m³程度の範囲で、単位CA₂量が60kg/m³程度までの範囲において比較した場合、単位質量あたりの塩化物イオンの固定化上限値について、CA₂はセメントの約18～22倍の固定化上限値を持つことになる。

ここで、田原ら³⁾の研究結果より、水/結合材比=50%のセメントペーストを10%NaCl水溶液中に91日間浸漬した結果を図3.5.14に示す。OPC、CA₂:5%およびCA₂:10%の結果から、普通セメントおよびCA₂の単位質量あたりの固定塩化物イオン量を計算した結果を表3.5.6に示す。CA₂の混和率が大きくなるにしたがって、固定塩化物イオンが増加していることがわかる。この結果から、普通セメントおよびCA₂の単位質量あたりの固定塩化物イオン量を算出し、その値を比較すると、CA₂:5%で24倍、CA₂:10%で27倍であった。

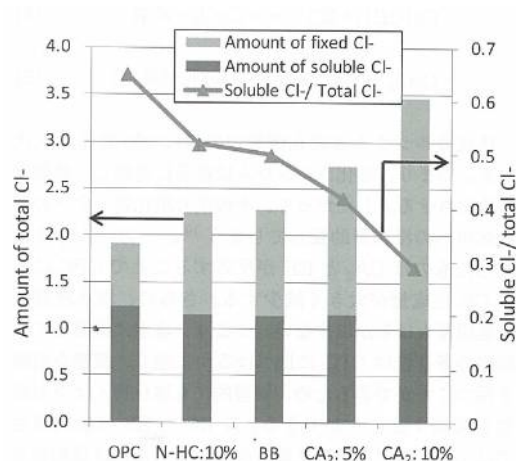


図3.5.14 普通セメントとCA₂を混和したセメントペーストの塩化物イオン量³⁾

表 3.5.6 既往の研究³⁾における普通セメントおよび CA₂ の単位質量あたりの
固定化塩化物イオン量

	OPC	CA ₂ : 5%	CA ₂ : 10%
可溶性塩化物イオン量 (kg/m ³)	1.2	1.2	1.0
固定化塩化物イオン量 (kg/m ³)	0.7	1.5	2.5
〔CA ₂ の単位質量あたりの固定化塩化物イオン量〕 〔普通セメントの単位質量あたりの固定化塩化物イオン量〕	—	24 倍	27 倍

表 3.5.6 における普通セメントおよび CA₂ の単位質量あたりの固定化塩化物イオン量を固定化上限値とすると、その能力の倍率は、今回検討した結果（約 18～22 倍）とおおむね一致しており、その整合性が確認できた。

3.5.4 実験結果の再現

（１）実験結果の再現

塩化物イオンを混和したコンクリートに、打継部 NM, NCA5, NCA10, PMM, PCA5 のモルタルを打ち継いだ実験結果を、前述の解析モデルを用いて再現した。なお、見かけの拡散係数は、既設コンクリート部が 2.0cm²/年、打継部が普通モルタルベースとなる NM, NCA5 および NCA10 が 0.5cm²/年、打継部がポリマーセメントモルタルベースとなる PMM および PCA5 は 0.13cm²/年とした。

これらの拡散係数は、3.3 節の供試体作製時に各配合について、JSCE-G572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法（案）」にしたがって、φ100×200mm 供試体から φ100×150mm の円柱供試体を切り出して試験を行った。養生条件は、供試体打設後 28 日まで 20℃ 水中養生を行った後に、浸せき試験を 6 か月間行ったものである。

実験値と解析値を比較したもののうち、打継部が NM, NCA5 および PCA5 を図 3.5.15 から図 3.5.17 に示す。

図 3.5.15 の普通モルタルにおいて、打継部の界面近傍の塩化物イオンの固定化の割合が増えていることが確認できる。図 3.5.16 の CA₂ を混和したモルタル NCA5 では、打継部の界面近傍の固定化塩化物イオン量の割合は CA₂ を混和しない NM よりも増加している。また、界面近傍の既設コンクリート部の可溶性塩化物イオンが CA₂ を混和しない NM よりも減少しており、実験値を十分に再現できているといえる。

図 3.5.17 の CA₂ を混和したポリマーセメントモルタル PCA5 においても普通モルタルと拡散係数が異なるだけで、CA₂ を混和した普通モルタルと同様に打継部の界面近傍の塩化物イオンの固定化の割合が増加しており、こちらも実験値を再現できているといえる。なお、ここでは省略したが、打継部が NCA10, PMM についても実験値を再現できる結果が得られた。

以上のことから、3.5.2 (2) で設定した仮定 1～4 を前提として行った数値解析が、実験値を再現できたことから、これらの仮定は成立しうるものと考えられる。ただし、中性化を受けた場合、フリーデル氏塩は分解して塩化物イオンが再び解離してしまうことも知られており、中性化などの複合劣化を受ける場合は、これらの仮定が成立しないことに注意が必要である。

なお，時間の尺度において実験値と解析値に差異があるが，実験値では既設部のコンクリートの塩化物イオン量が材齢 642 日で 10kg/m^3 から 8kg/m^3 程度に低下しているのに対して，解析値は材齢 3 年程度，PCA5 では 8 年程度で実験値と同程度となる．

今回の解析値は浸せき試験により求めた見かけの拡散係数を $2.0\text{cm}^2/\text{年}$ としたものであるが，試験の供試体は水中養生を行っているが，実際の供試体は封緘養生および乾燥養生であり，供試体が置かれた養生条件が異なっていた．そのため，実際の供試体では浸せき試験の供試体よりも拡散係数が大きかった可能性があると考えられる．

参考として，既設部のコンクリートの見かけの拡散係数を $4.0\text{cm}^2/\text{年}$ とした解析値を材齢 642 日で比較したものを図 3.5.18 に示す．実験値と解析値が近づくことが確認できる．

t	実験値	解析値
0 日		
642 日		
3 年		
5 年		

図 3.5.15 再現解析（普通モルタル NM $CA_2 : C \times 0\%$ ）

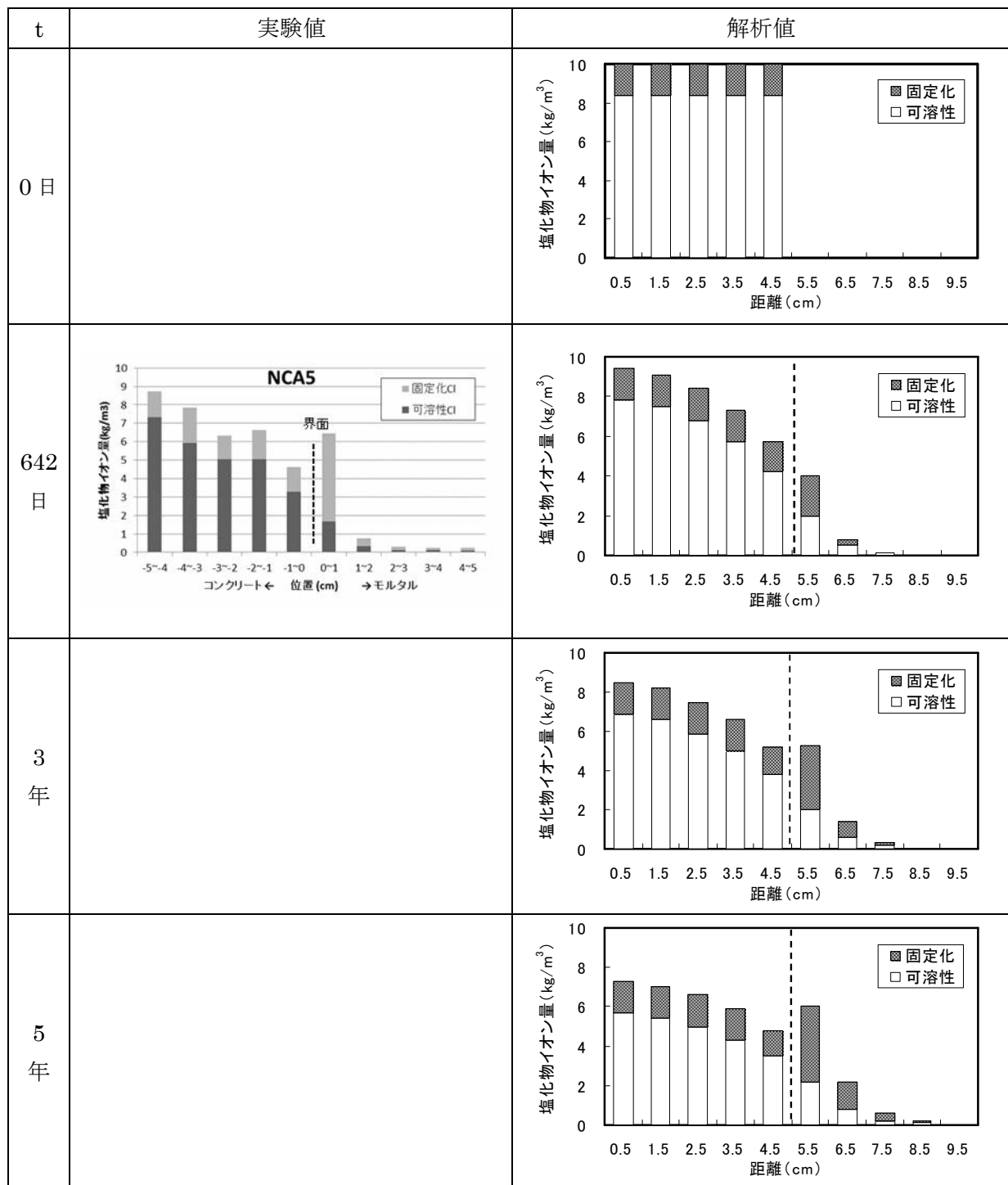


図 3.5.16 再現解析 (普通モルタル NCA5 $CA_2 : C \times 5\%$)

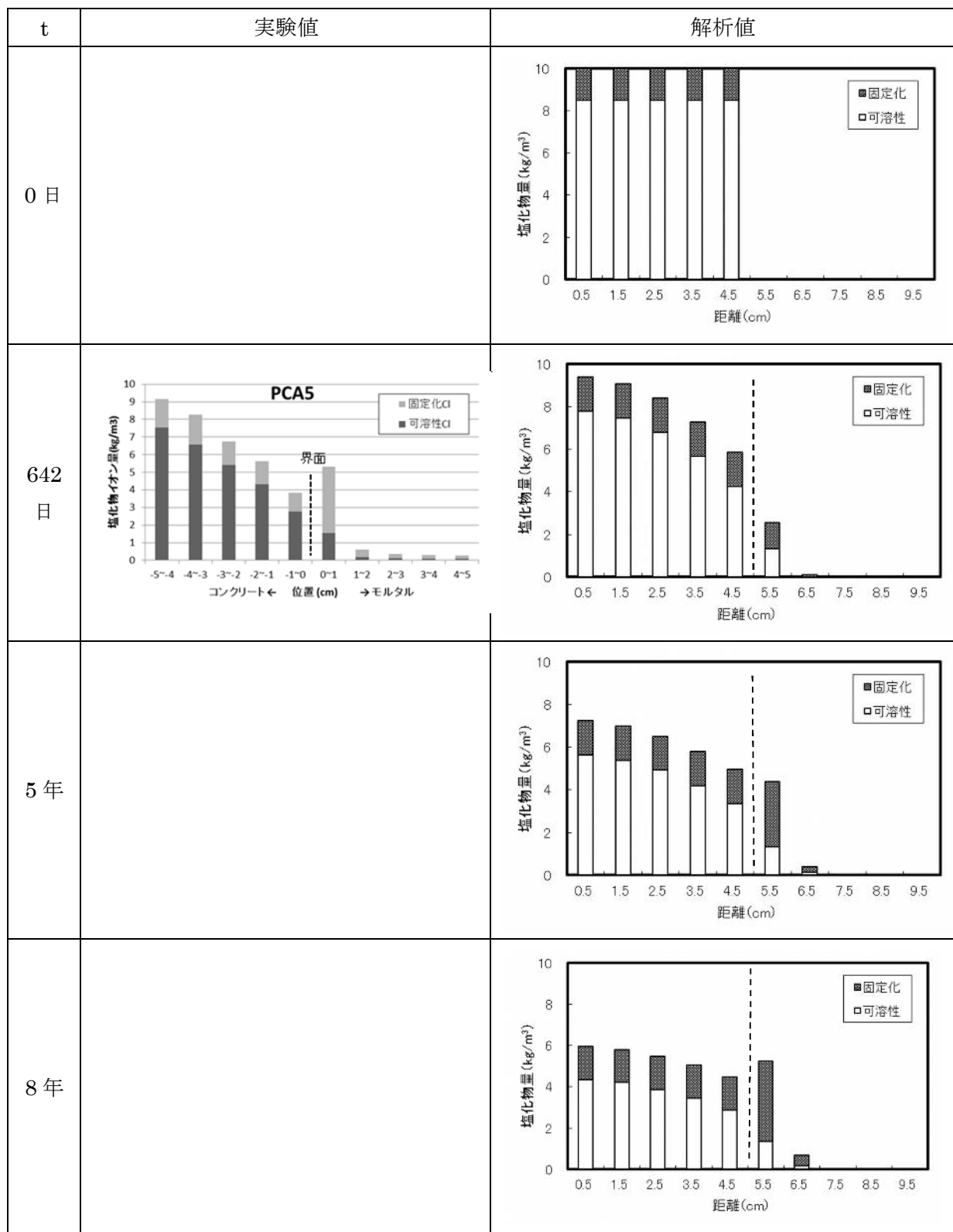


図 3.5.17 再現解析 (ポリマーセメントモルタル PCA5 $CA_2 : C \times 5\%$)

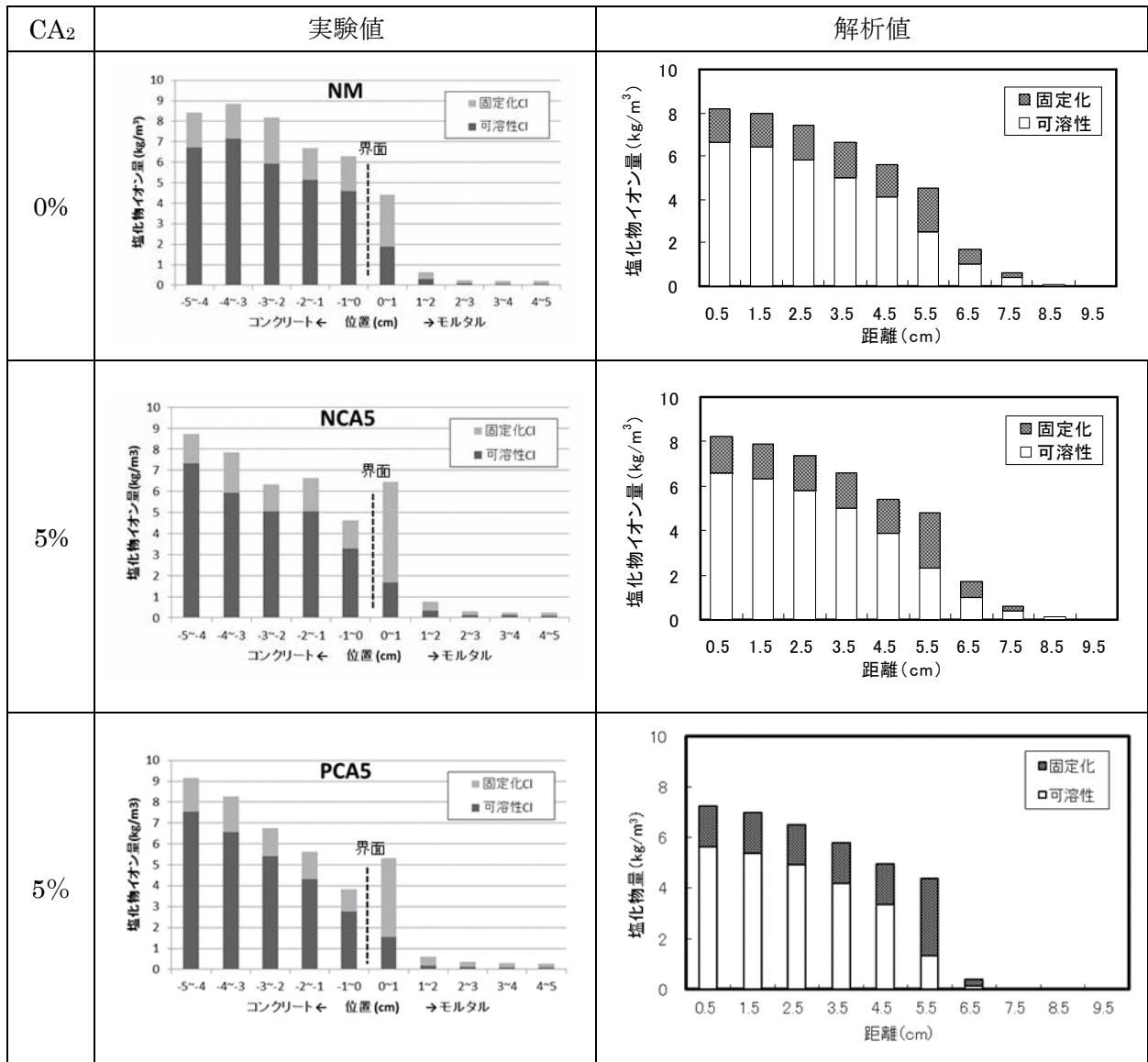


図 3.5.18 拡散係数を補正した解析値 (材齢 642 日)

(2) 躯体コンクリートの塩化物イオン量が異なる場合のケーススタディ

打継部モルタルが NCA5 の条件において、躯体コンクリート部の初期の塩化物イオン量を 5.0, 2.0kg/m³と設定した場合の試算結果を図 3.5.19 に示す。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が、5.0kg/m³および 2.0kg/m³と少量となった場合においても、CA₂を混和したモルタルを打ち継いだものは、打継部の界面近傍の固定化塩化物イオン量の割合が大きく増加していることが確認できる。

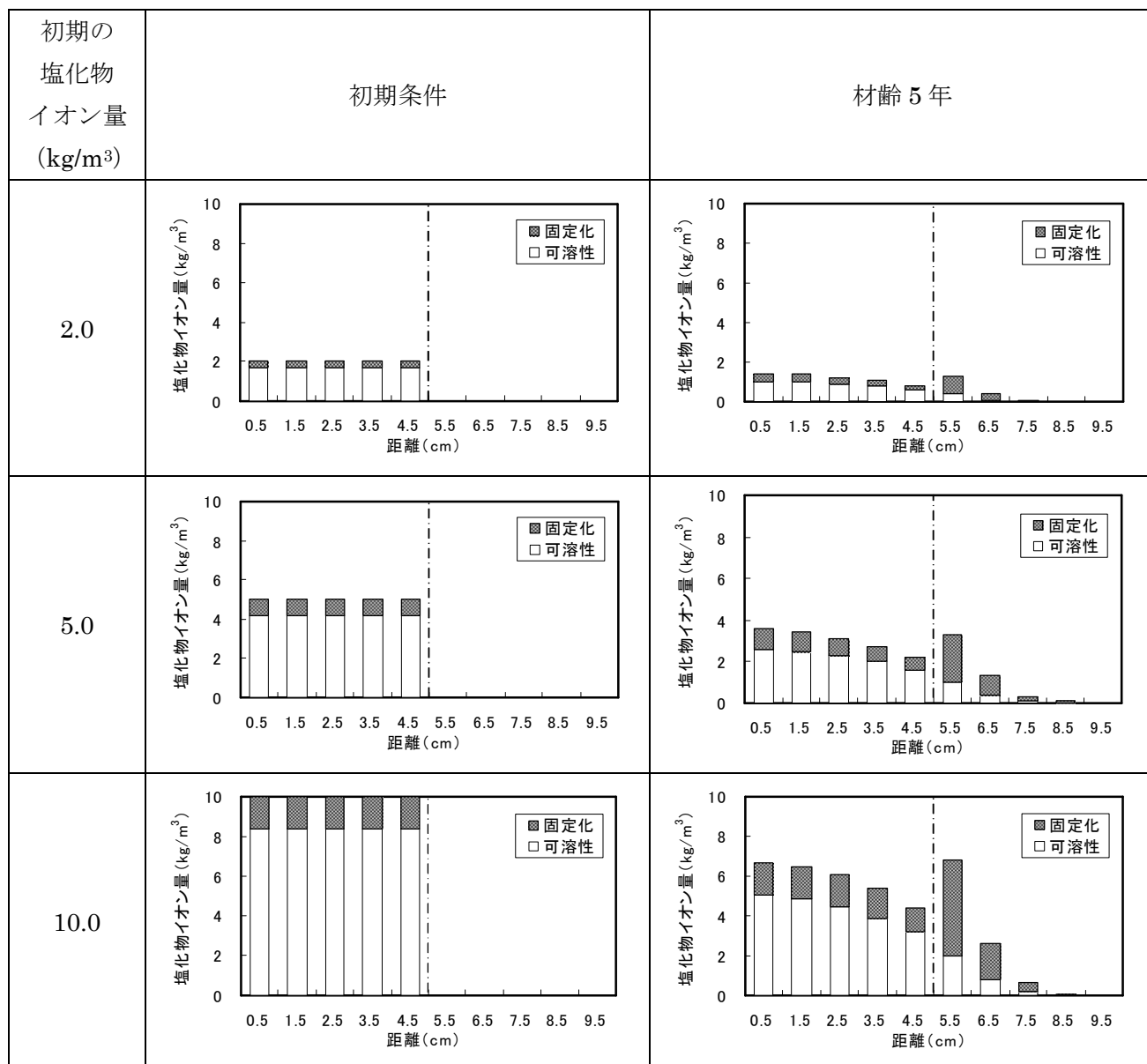


図 3.5.19 躯体コンクリート中の塩化物イオン量が異なる場合のケーススタディ

3.5.5 断面修復工法を想定したケーススタディ

(1) はじめに

前述の解析モデルを基に、塩害を受けるコンクリートを想定して、 CA_2 を混和したモルタルを断面修復材として断面修復工法を行った場合の効果について、ケーススタディを実施した。

図 3.5.20 に示すように、かぶりが 30mm で直径 13mm の鉄筋を設置し、表面の塩化物イオン濃度が 8kg/m^3 となる塩害劣化環境において 5 年間暴露されたコンクリート構造物を想定した。断面修復深さは、鉄筋表面までの 30mm、鉄筋中間までの 36mm、鉄筋が完全に露出する 43mm、および鉄筋の裏までの 50mm について検討した。各々の深さをはつり取り、各種断面修復材料で修復した場合について検証した。

(2) 初期の劣化条件

見かけの拡散係数が $2.0\text{cm}^2/\text{年}$ のコンクリート構造物を想定し、表面の塩化物イオン濃度が 8kg/m^3 となる塩害劣化環境において 5 年間暴露された状況で、断面修復工法を実施したものとした。断面修復工法の実施前のコンクリート中の塩化物イオンの分布を *Fick* の拡散方程式により算定した結果を図 3.5.21 に示す。

(3) 解析条件と解析水準

解析条件と解析水準を表 3.5.7 に示す。既設のコンクリートは、単位セメント量が 298kg/m^3 で $W/C=50\%$ 、見かけの拡散係数が $2.0\text{cm}^2/\text{年}$ とした。断面修復材は CA_2 の混和率を変えたポリマーセメントモルタルの Case 1 から Case 3 の 3 水準を検討した。また、断面修復深さをコンクリート表面から 30mm、36mm、43mm および 50mm とした。

Case 1 は、単位セメント量が 630kg/m^3 の一般のポリマーセメントモルタルを想定した。Case 2 および Case 3 は、Case 1 のポリマーセメントモルタルを基準として、 CA_2 をそれぞれセメント量に対して 5% である 31kg/m^3 、および 10% である 62kg/m^3 を使用した場合である。

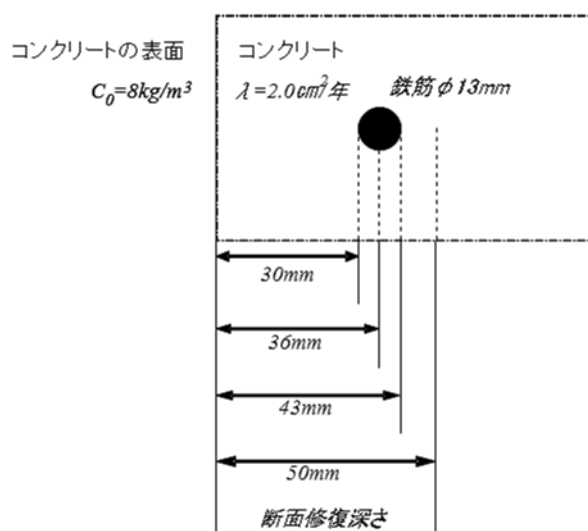


図 3.5.20 解析対象のコンクリート構造物の模式図

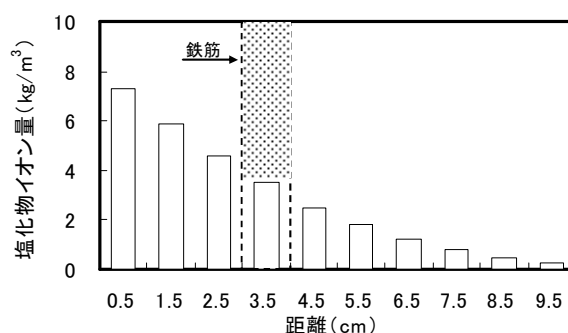


図 3.5.21 断面修復前の全塩化物イオン分布状況

表 3.5.7 解析条件および解析水準

	項目	既設部	断面修復部
Case 1 CA ₂ が C×0%のポリマーセメントモルタルで断面修復をした場合	拡散係数 (cm ² /年)	2.0	0.13
	単位セメント量 (kg/m ³)	298	630
	CA ₂ の単位量 (kg/m ³)	0	0
	固定化の割合 n	0.27	0.57
	固定化の上限値 m (kg/m ³)	1.6	2.5
Case 2 CA ₂ が C×5%のポリマーセメントモルタルで断面修復をした場合	拡散係数 (cm ² /年)	2.0	0.13
	単位セメント量 (kg/m ³)	298	590
	CA ₂ の単位量 (kg/m ³)	0	31
	固定化の割合 n	0.27	0.63
	固定化の上限値 m (kg/m ³)	1.6	5.1
Case 3 CA ₂ が C×10%のポリマーセメントモルタルで断面修復をした場合	拡散係数 (cm ² /年)	2.0	0.13
	単位セメント量 (kg/m ³)	298	560
	CA ₂ の単位量 (kg/m ³)	0	62
	固定化の割合 n	0.27	0.70
	固定化の上限値 m (kg/m ³)	1.6	7.8

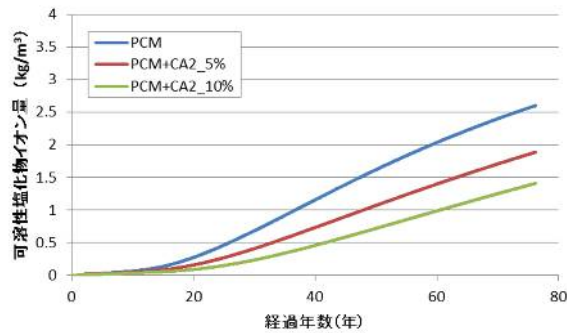
(4) 解析結果

コンクリート中における塩化物イオン量の発錆限界量は、「2013 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」に準拠して既設コンクリート配合から全塩化物イオン量 1.69kg/m³とした。

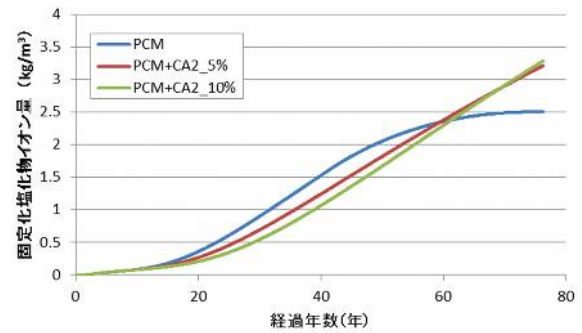
断面修復後の塩化物イオン量の経時変化の例として、断面修復深さが 50mm の場合における鉄筋位置の各塩化物イオン量の解析結果を図 3.5.22 に示す。なお、図中の塩化物イオン量は鉄筋位置の 30～40mm 位置の各塩化物イオン量の平均値である。

可溶性塩化物イオン量は、全ての断面修復材の条件において、表面から供給される塩化物イオンにより経過年数とともに少しずつ増加していく傾向がみられた。一方、固定化塩化物イオン量は、断面修復材によりある期間が経過すると、固定化塩化物イオン量が上限値となり、その後の固定化塩化物イオン量は増加しない傾向となった。例えばポリマーセメントモルタル単体では 70 年後以降は約 2.5kg/m³で固定化塩化物イオン量は頭打ちとなっている。一方、CA₂を混和したものは、固定化塩化物イオン量の上限値は大きく、50 年以上の長期間にわたって頭打ちの傾向は示していない。

次に各断面修復深さの条件における断面修復後の経過年数と鉄筋位置の 30～40mm 位置の全塩化物イオン量の平均値との関係を図 3.5.23 に示した。

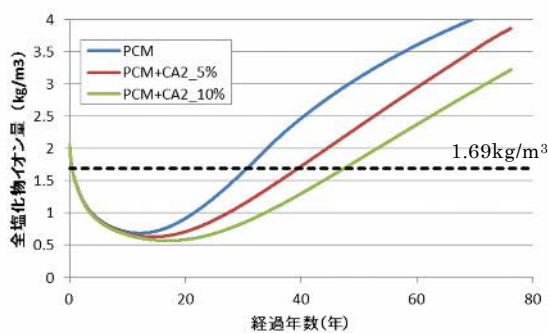


(a) 可溶性塩化物イオン量

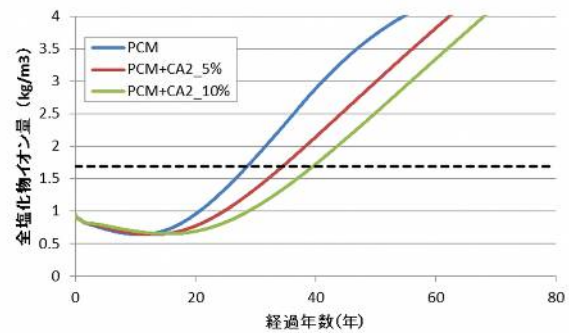


(b) 固定化塩化物イオン量

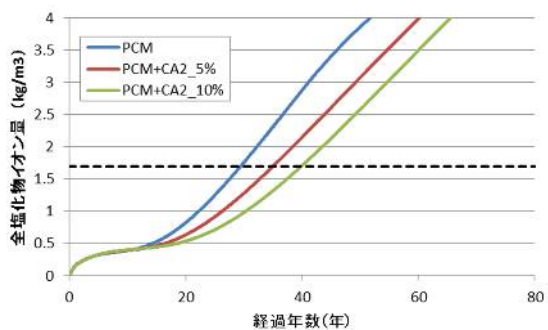
図 3.5.22 鉄筋位置における塩化物イオン量の経時変化の例（断面修復深さ 50mm の場合）



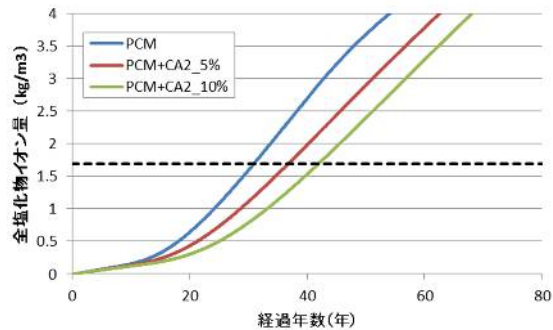
(a) 断面修復深さ 30mm



(b) 断面修復深さ 36mm



(c) 断面修復深さ 43mm



(d) 断面修復深さ 50mm

図 3.5.23 各断面修復深さの違いによる鉄筋位置における全塩化物イオン量の経時変化

断面修復深さ 30mm では、半年程度のわずかな期間ではあるが、全塩化物イオンが発錆限界量を超える期間があるので、断面修復深さが不足していると判断した。

断面修復深さ 36mm では、CA₂を混和しないポリマーセメントモルタルで修復した場合、断面修復後 28.6 年で全塩化物イオン量が発錆限界量の 1.69kg/m³に達した。同様に、CA₂を C×5% 使用したポリマーセメントモルタルでは 35.5 年、CA₂を C×10% 使用したポリマーセメントモルタルでは 39.5 年となり、断面修復深さが鉄筋の半分まで露出する程度でも 20 年程度の耐久性が確保でき、断面修復材に CA₂を用いることで、可溶性の塩化物イオンが固定化されること、ま

た、固定化により拡散の駆動力となる可溶性塩化物イオン量が少なくなり、結果として全塩化物イオンの拡散も抑制されることが、数値解析の結果から明らかとなった。

以上の結果をまとめ、各ポリマーセメントモルタルにおいて、鉄筋位置の全塩化物イオンが発錆限界量である 1.69kg/m^3 に達するまでの期間と断面修復深さとの関係を図 3.5.24 に示す。

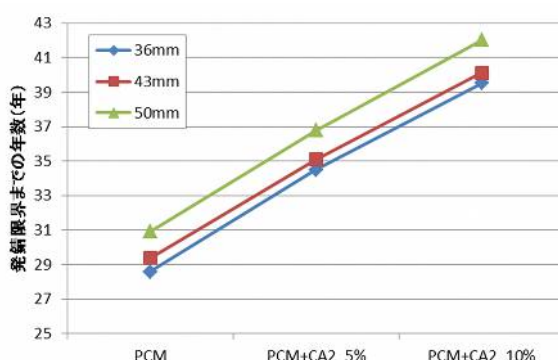


図 3.5.24 鉄筋位置と全塩化物イオン量が発錆限界量に達する年数の関係

発錆限界量に達するまでの期間は断面修復深さが 36mm の場合が最も短く、断面修復深さが大きくなるほど長くなり、断面修復深さが 50mm の場合が最も長くなる結果となった。さらに断面修復材であるポリマーセメントモルタルに CA_2 を混和することにより、発錆限界に達するまでの期間が大きく向上することが認められた。例えば、 CA_2 をセメント量の 5% 混和したポリマーセメントモルタルは、断面修復深さが 36mm の場合でも、 CA_2 を混和しないポリマーセメントモルタルの断面修復深さ 50mm の場合よりも発錆限界に達するまでの期間は長くなる結果となった。

（５）ライフサイクルコストの算出

前項までに検討したコンクリート構造物に断面修復工法を適用するにあたって、ライフサイクルコストを算出した。断面修復は、ポリマーセメントモルタルを用いた Case 1～3 の 3 パターンを検討することとした。断面修復工事のサイクルとしては、鉄筋位置において全塩化物イオンが発錆限界量となる年に断面修復工事を行うこととした。図 3.5.24 の結果を考慮し、断面修復工事を行う期間を決定した。断面修復工事を行うサイクルを表 3.5.8 に示す。また、想定したはつり作業と断面修復工の単価を表 3.5.9 に示す。供用年数は 100 年とし、割引率および定期点検費用は考慮しなかった。ライフサイクルコストの算出結果を図 3.5.25 に示す。

表 3.5.8 各ケースにおける断面修復工事を行うサイクル

	Case2 : CA_2 0%	Case3 : CA_2 5%	Case4 : CA_2 10%
断面修復深さ : 36mm	28 年	34 年	39 年
断面修復深さ : 43mm	29 年	35 年	40 年
断面修復深さ : 50mm	30 年	36 年	42 年

表 3.5.9 各ケースにおける施工単価（単位：円/㎡）

断面修復深さ （断面修復深さ）	はつり工 （ウォータージェット）	断面修復工（左官工）		
		Case1 : CA_2 0%	Case2 : CA_2 5%	Case3 : CA_2 10%
36mm	49,000	22,180	26,020	29,850
43mm	55,000	25,160	29,750	34,330
50mm	59,000	28,150	33,480	38,800

ライフサイクルコストの試算結果から、供用年数 100 年においては断面修復深さが 36mm で CA_2 をセメントに対して 5% 混和したポリマーセメントモルタルを用いたケースが最も費用が小さくなる結果となった。なお、供用期間が 50 年においては断面修復深さが 36mm で CA_2 を混和しないポリマーセメントモルタルを用いたケースの費用が最も小さくなり、供用期

間 80 年では断面修復深さが 50mm で CA_2 をセメントに対して 10% 混和したポリマーセメントモルタルを用いたケースが最も費用が小さくなっており、想定する供用年数により最適な断面修復材の種類と断面修復深さが異なる結果となった。

全体的には、供用年数が長くなると CA_2 を混和した断面修復材を用いたケースが CA_2 を混和しない断面修復材を用いるケースに比べてライフサイクルコストが小さくなる傾向にあることが認められる。長期の耐久性を想定する場合、断面修復材に CA_2 を混和することで、断面修復工法におけるライフサイクルコストを小さく抑えることができると考えられる。

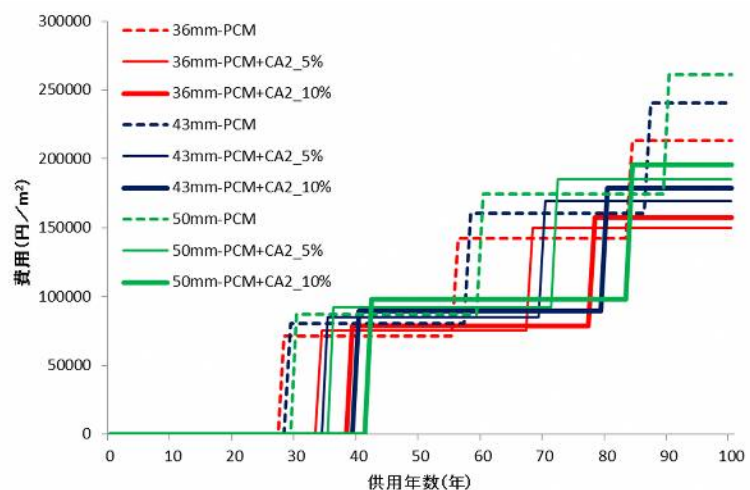
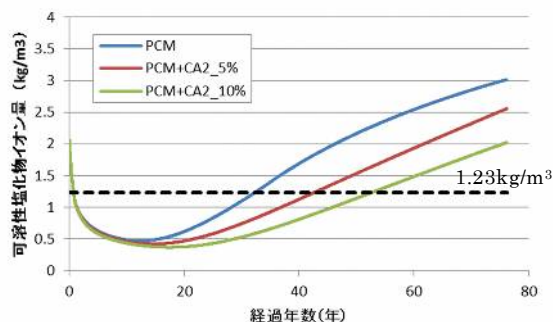


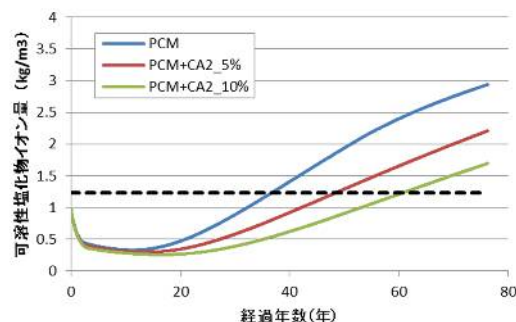
図 3.4.25 各ケースにおけるライフサイクルコスト試算結果

【参考】発錆限界値を可溶性塩化物イオン量で規定した場合の耐久性検討

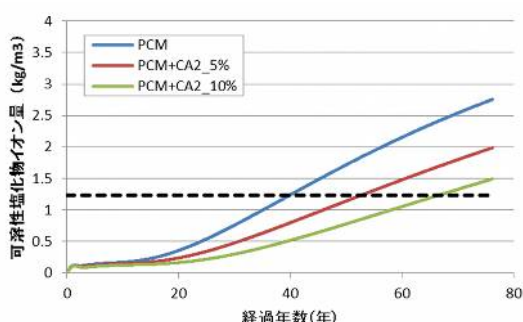
前項で検討した断面修復工法におけるライフサイクルコストは、発錆限界値を全塩化物イオン 1.69kg/m^3 とした場合であった。しかし、田中ら⁸⁾が指摘するように、実際に鉄筋腐食に影響するのは、細孔溶液中に含まれる塩化物イオンに限られると考えられている。また、コンクリート内の塩化物イオンのすべてが細孔溶液に溶けているのではなく、一部はアルミネート相の水和物であるモノサルフェートと反応しフリーデル氏塩として固定されるので、固定化された塩化物イオンは鋼材の発錆には関与しないと考えられている。そこで本項では、発錆限界値を可溶性塩化物イオン量に基づいて算出する。図 3.5.10 で検討した単位セメント量と固定化割合の関係から、既設コンクリートの発錆限界の全塩化物イオン量 1.69kg/m^3 のうち、可溶性塩化物イオン量は 1.23kg/m^3 と算出し、これを本解析における発錆限界の可溶性塩化物イオン量とした。各断面修復深さの条件における断面修復後の経過年数と鉄筋位置の 30～40mm 位置の可溶性塩化物イオン量の平均値との関係を図 3.5.26 に示す。



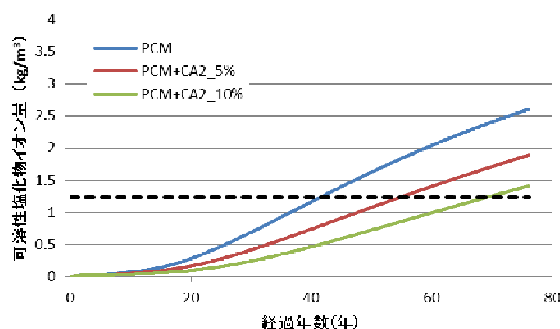
(a) 断面修復深さ 30mm



(b) 断面修復深さ 36mm



(c) 断面修復深さ 43mm



(d) 断面修復深さ 50mm

図 3.5.26 各断面修復深さの違いによる鉄筋位置における可溶性塩化物イオン量の経時変化

可溶性塩化物イオンの経時変化も全塩化物イオンとほぼ同様の傾向を示す。CA₂を混和したポリマーセメントモルタルは混和しないものに比べて、発錆限界値まで到達する期間が長くなる傾向となる。但し、断面修復深さが 30mm の条件では、全塩化物イオン施工直後から半年程度の短い間ではあるが発錆限界値を超えている期間があるので、断面修復深さとしては不適當であると考えられる。次に、断面修復深さが 43mm の条件において、発錆限界量を可溶性塩化物イオンがである 1.23kg/m³の基準とした場合と、全塩化物イオン量 1.69kg/m³を基準とした場合について比較したものを図 3.5.27 に示す。

可溶性塩化物イオン量を基準とした場合の発錆限界までに達する年数は、全塩化物イオン量を基準とした場合に比べて長くなる傾向にある。これは、CA₂を混和しない普通ポリマーセメントモルタルは単位セメント量が大きく、コンクリートよりも高い塩化物イオン固定化能力があるためと考えられる。また、CA₂を混和することによる発錆限界値までの期間を長くすることのできる効果は、可溶性塩化物イオン量を

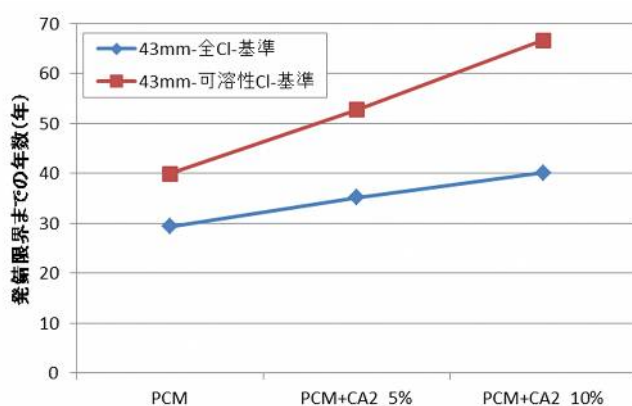


図 3.5.27 発錆限界値の基準の違いと発錆限界量に達するまでの年数の関係

基準とした場合の方がより高い効果を得られる。これは、 CA_2 を混和することにより塩化物イオン量を固定化できる量や割合が高くなるため、可溶性塩化物イオン量が既定の値に達するまでの期間を短くできるためと考えられる。

以上の検討より、仮に可溶性塩化物イオン量を発錆限界値の基準とした場合、塩素固定化材 CA_2 を混和することによる耐久性向上効果は一層高まるものと考えられる。

3.5.6 本節のまとめ

塩化物イオンを混和したコンクリートと塩素固定化材 CA_2 を用いたモルタルを打ち継いだ場合の、塩化物イオンの拡散挙動について、塩化物イオンを拡散については Fick の法則を支配方程式とし、さらに単位セメント量や CA_2 量を考慮した可溶性塩化物イオンの固定化モデルを提案し、数値解析的な検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) CA_2 を用いたコンクリートの塩化物イオンの拡散挙動は、Fick の法則に、塩化物イオンの固定化の割合および固定化の上限値を導入することで再現できる。
- (2) 塩化物イオンの固定化の割合および固定化の上限値は、単位セメント量および CA_2 の単位量で整理できる。
- (3) CA_2 は、セメントに対して固定化の割合が 3.5 倍、固定化の上限値（容量）が約 20 倍の効果を持つ。
- (4) 上記解析モデルを用いて、塩害劣化を想定したコンクリートの断面修復についてケーススタディをした結果、 CA_2 を使用することで鉄筋腐食に対する耐久性を大幅に延長することができる。
- (5) 断面修復工法を実施する場合のライフサイクルコストを試算した結果、想定する供用年数により最適な断面修復深さがあることがわかった。また、長期の耐久性を考慮する場合、断面修復材に CA_2 を混和することで、断面修復工法におけるライフサイクルコストを小さく抑えることができる。

3.6 本章のまとめ

カルシウムアルミネート (CA_2) を主成分とする塩素固定化材について、セメント種類や粒度分布が塩素固定化能力に与える影響や、それを用いた断面修復材について、ポリマーセメントモルタルに適用した場合の基礎物性を確認した。また、塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の断面修復工法を模擬し、塩化物イオンを混和したコンクリートと CA_2 を混和したセメントモルタルを打ち継いだ場合の塩化物イオンの拡散挙動について実験的に検討を行い、さらにその挙動について数値解析的な検討を行った。その主な結果は以下のとおりである。

- (1) 塩素固定化材の主成分である CA_2 は、普通、早強、低熱のいずれのポルトランドセメントでも塩素固定化能力を発揮する。
- (2) CA_2 の微粒分をカットする粒度分布を制御することで、フローダウンと乾燥収縮をある程度抑制することが分かった。また、粒度分布を制御したもので、塩素固定化能力はほとんど変わ

らない。

(3) 塩素固定化材を混和したポリマーセメントモルタルは、混和しないものに比べて圧縮強度や付着強度に大きな差異はなく、塩化物イオン固定化能力、塩化物イオン抑制および中性化抑制能力を有し、その有効な混和率は、セメントに対して 5%である。

(4) 塩素固定化材を混和したセメントモルタルおよびポリマーセメントモルタルと塩化物イオンを混和したコンクリートを打ち継いだ場合、塩化物イオンを含むコンクリート側の鉄筋の腐食を抑制する効果があることが示唆された。

(5) 塩化物イオンを混和したコンクリートと塩素固定化材を混和したモルタルを打ち継いだ場合、界面付近の可溶性塩化物イオンは、コンクリートからモルタル側に塩素固定化材を混和しないモルタルを打ち継いだ場合よりも多く移動し、界面付近のコンクリート側の可溶性塩化物イオンは塩素固定化材を混和しないモルタルを打ち継いだ場合よりも減少する。また、界面付近のモルタル側の固定化塩化物イオンが卓越して増加する。これは、 CA_2 から生成した HC が可溶性塩化物イオンを固定化するためと考えられる。

(6) 塩素固定化材を用いたコンクリートの塩化物イオンの拡散挙動は、可溶性塩化物イオンが *Fick* の法則による拡散に従い、塩化物イオンの固定化の割合および固定化の上限値を導入することで数値解析的に再現することが可能であることが分かった。

(7) 上記解析モデルを用いて、塩害劣化を想定したコンクリートの断面修復についてケーススタディをした結果、塩素固定化材を用いた断面修復材を使用することで鉄筋腐食に対する耐久性を大幅に延長することができる。

以上のことから、塩害劣化を受けるコンクリート構造物に塩素固定化材を混和した断面修復材を適用した際の鉄筋腐食に対する耐久性について、一定の整理はできたものと考えている。

しかし、今回の試験で残っている問題点として、以下のことがあげられる。

- (1) 中性化と塩害の複合劣化を受けた際の耐久性
- (2) 数値解析における拡散係数の設定
- (3) 塩化物イオン量の発錆限界値の基準を可溶性塩化物イオン量とした場合の妥当性

これらについては、さらに継続して実施中の打継供試体の試験により、引き続きデータを蓄積し、また、新たに試験を行うことでさらなる解明が必要と考えている。

【第3章 参考文献】

- 1) 成田榮一：層状複水酸化物のインターカレーション特性とその利用，粘土科学，Vol.46，No.4，pp.204-218，2007
- 2) 荒井康夫：セメントの材料科学，pp.195-196，1998
- 3) 盛岡実，田原和人，山本賢司，荒木昭俊： $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ の塩化物イオンの拡散抑制効果とその機構，土木学会コンクリート技術シリーズ No.89，混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会（333 委員会）報告書，No.2，pp.443-448，2010
- 4) 田原和人，山本賢司，芦田公伸，盛岡実： $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ を混和したセメント硬化体の塩化物イオン固定化挙動，セメント・コンクリート論文集，No.64，pp.428-434，2010

- 5) J.Stark, B.Wicht : コンクリートの耐久性 (第2版), pp.74-75, セメント協会, 2003
- 6) P. Tongyan, L. Yajun : Computational Molecular Analysis of Chloride Transport in Hydrated Cement Paste, Transportation Research Board of the National Academies, Vol.2113, pp.31-40, 2009
- 7) 土木学会 : 2013 年制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕, pp.170-173, 2013
- 8) 小林一輔 : コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集 No.433/V-45, pp.1-14, 1991
- 9) 田中秀治, 古賀裕久, 河野広隆 : 各種セメントを用いたモルタルの塩化物イオン固定量に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.843-848, 2004
- 10) 田原和人, 宮口克一, 盛岡実, 武若耕司 : $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ を混和した種類の異なるセメント硬化体の水和挙動および塩化物イオン固定化能力, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.427-433, 2011
- 11) 田原和人, 宮口克一, 山口明伸, 武若耕司 : 粒度分布を制御した $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ を混和したセメント硬化体の基礎物性および塩化物イオン固定化能力, セメント・コンクリート論文集, No.66, pp.491-497, 2012
- 11) 宮口克一, 庄司慎, 盛岡実, 西岡幹雄, 上東泰 : 塩化物イオン固定化材を混和したポリマーセメントモルタルの基礎物性, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, 第13巻, pp.329-332, 2012
- 12) 宮口克一, 盛岡実, 山口明伸, 武若耕司 : 塩素固定化材を混和したモルタルと内在塩分を多く含むコンクリートを打ち継いだ場合の塩化物イオンの移動挙動, セメント・コンクリート論文集, No.68, 印刷中

第4章 犠牲陽極材を併用した断面修復工法における鉄筋防食性能

4.1 はじめに

塩害や中性化などにより劣化したコンクリート構造物を補修する場合、劣化したコンクリートをウォータージェットなどで除去し、除去した断面をポリセメントモルタルなどの耐久性の高い材料で修復する断面修復工法を実施することが多く実施されている。しかし、この断面修復工法により補修されたコンクリート構造物は、比較的早期に再劣化が発生する場合があることも知られている¹⁾。

この再劣化のメカニズムについては、これまでに多くの研究がなされており²⁻⁵⁾、断面修復境界部に施工欠陥がある場合の他に、断面修復の境界部を貫通する鉄筋において、マクロセル腐食回路が形成されるためと報告されている。2章で触れたように、鉄筋のマクロセル腐食とは、連続する鉄筋の同じ表面において劣化因子の量が部分的に異なる場合に生じ、アノード部（腐食部）とカソード部（非腐食部）が離れた位置にあり、この間をマクロセル電流が流れアノード部が腐食する現象である。

ここで、断面修復工法を行った後のコンクリート構造物を想定すると、既設コンクリート部と断面修復部を貫通する鉄筋表面において、塩化物イオン濃度や各種条件の違いにより電位差が生じることになり、結果として、既設コンクリート部分をアノード部、断面修復部分をカソード部とする腐食電池回路が形成されることになる。このマクロセル腐食による鉄筋の腐食速度は鉄筋全面腐食（ミクロセル腐食）の最大2倍に達することもあるとされている⁵⁾。したがって、断面修復工法を適用する際には、このマクロセル腐食を抑制あるいは防止する材料や工法の選定が必要となる。

こうした背景から、断面修復工法を適用した際に生じるマクロセル腐食およびミクロセル腐食による鉄筋腐食を抑制あるいは防止する材料として、流電陽極方式の電気防食工法の原理を用いて、鉄筋に用いる鉄よりもイオン化傾向の高い亜鉛を用いた犠牲陽極材が開発され、多くの施工実績を重ねてきている。

しかし、その防食効果や断面修復材の電気抵抗性状の影響などについて、これまでに研究が行われているが⁶⁻⁸⁾、一方で明確にされていない部分も多い。また、いずれも犠牲陽極材の設置位置は断面修復材の内部を前提としたもので、外部、つまりコンクリートの表面に取付けを検討した例はほとんどないと考えられる。

そこで、本研究では、塩害劣化を受けたコンクリート構造物の断面修復工法を模擬し、表 4.1.1 に示すように条件が異なる供試体を作製し、躯体コンクリートの塩化物イオン量や、犠牲陽極材の設置位置および断面修復材の種類によって、犠牲陽極材の鉄筋防食効果がどのような影響を受けるか実験的に検討を行った。これらの結果を踏まえ、塩害劣化を受けたコンクリート構造物の断面修復工法と併用する犠牲陽極工法の適用範囲を明確化することを試みた。

また、実験で測定した鉄筋に流れるマクロセル電流密度、復極量、分極抵抗および分極曲線の電気化学的測定データと、実際の鉄筋の腐食減量とを比較して、これらの電気化学的測定データが鉄筋の防食（あるいは腐食）状態の指標として適切かどうかについても検討を行った。

さらに、測定したデータを用いて、犠牲陽極材の防食効果について数値解析による検討を行い、

犠牲陽極材の耐久性についても検討を行った。

表 4.1.1 本研究で検討した断面修復工法を模擬した供試体の内容

No.	犠牲陽極材	暴露環境条件	躯体 Con 強度	躯体塩分量	断面修復材
1	断面修復材 内部設置	20℃ 40-50%RH	21N/mm ²	2kg/m ³	一般 PCM
2				5kg/m ³	
3				10kg/m ³	
4				10kg/m ³	CA ₂ 混和 PCM
5	コンクリート 表面設置			2kg/m ³	一般 PCM
6				5kg/m ³	
7				10kg/m ³	
8				10kg/m ³	CA ₂ 混和 PCM
9				10kg/m ³	一般 PCM＋ 塗膜養生材塗布
10	設置なし			2kg/m ³	一般 PCM
11				5kg/m ³	
12				10kg/m ³	
13	断面修復材	35℃ 90%RH	21N/mm ²	10kg/m ³	一般 PCM
14	内部設置		40N/mm ²		
15	コンクリート		21N/mm ²		
16	表面設置		40N/mm ²		
17	設置なし		21N/mm ²		
18			40N/mm ²		

4.2 コンクリートの圧縮強度が犠牲陽極材の防食性能に与える影響

本節では、塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物に断面修復工法を実施したことを模擬した供試体を作製し、躯体コンクリートの圧縮強度の違いが犠牲陽極材の防食性能に与える影響について検討した。

4.2.1 使用材料および試験配合

(1) 使用材料

本検討で用いた材料を表 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 使用材料

水	上水道水
セメント	普通ポルトランドセメント（密度:3.15g/cm ³ ）
砂	姫川産砕砂（密度:2.62g/cm ³ ）
砂利	姫川産碎石（密度:2.66 g/cm ³ ）
減水剤	メラミンスルホン酸塩系高性能 AE 減水剤
塩化ナトリウム	試薬 1 級
断面修復材	市販の左官工法用断面修復材（ポリマーセメントモルタル） ・ ポリアクリル酸エステル（PAE）系ポリマーセメントモルタル ・ ポリマー/セメント比（P/C）＝5％ ・ 水/セメント比（W/C）＝45％ ・ その他にひび割れ抵抗性を高める目的でビニロン短繊維を混和

(2) コンクリートおよび断面修復材の配合

コンクリート配合は、表 4.2.2 に示すように呼び強度 24N/mm² と 40N/mm² の 2 種類とした。混和する塩化物イオン量は 10kg/m³ を目標として試薬の NaCl を外割で混和した。なお、目標スランプは 12±2.5cm とした。

また、各々の配合のコンクリートについて 20℃水中養生の材齢 28 日での圧縮強度および JISA1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠した全塩化物イオン量の測定結果を表 4.2.3 に示す。概ね目標通りの性状を有するコンクリートが得られた。

表 4.2.2 コンクリート配合

呼び強度 (N/mm ²)	W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	Air (%)	配合(kg/m ³)					
					W	C	S	G	Add	NaCl
21	59.0	13	48.0	4.5±1	164	278	881	972	2.78	16.5
40	39.0	13	44.2	4.5±1	169	434	731	980	4.34	16.5

表 4.2.3 圧縮強度および全塩化物イオン量

目標強度	圧縮強度(N/mm ²)	全塩化物イオン量(kg/m ³)
21N/mm ²	26.9	9.6
40N/mm ²	46.9	9.7

次に、試験で用いた断面修復材の配合と、JISA1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準拠して測定した材齢 28 日の圧縮強度を表 4.2.4 に示す。

断面修復材の圧縮強度は 40N/mm² 程度で、2 章の表 2.1.2 に示した一般に用いられている断面修復材と同等の性状を示している。

表 4. 2. 4 断面修復材の配合と材齢 28 日での圧縮強度

断面修復材の配合			材齢 28 日圧縮強度
項目	断面修復材	水	
製品 1 袋あたり	12.5kg	1.75kg	42.5N/mm ²
モルタル 1m ³ あたり	1750kg	245kg	

(3) 犠牲陽極材

本試験に用いた犠牲陽極材は犠牲陽極材の金属として亜鉛を用いたものである．犠牲陽極材の外観を写真 4. 2. 1 に示す．



写真 4. 2. 1 犠牲陽極材



写真 4. 2. 2 内部の亜鉛金属

写真 4. 2. 1 より、犠牲陽極材は直径 6cm、高さ 3.5cm の円柱状のものであり、亜鉛金属をバックフィル材で包み込んだ形状であり、鉄筋への取付けと導通のため内部の亜鉛金属に軟鋼線が 2 本通してある．

次に、未使用の犠牲陽極材をハンマーで砕き、亜鉛を包んでいたバックフィル材を取り除き、内部の亜鉛を取り出した状況を写真 4. 2. 2 に示す．

写真に示すように、亜鉛金属は表面に凹凸があるが、概ね直径 3.9cm×高さ 0.7cm の円盤状であった．質量を計測したところ、61.9g であった．

さらに、亜鉛を覆っていたバックフィル材を 1.2mm 以下まで粉砕し、ビーカーにて上水道水と水/硬化体比=2/1 で混ぜ合わせて 24 時間 20℃室内に静置した後、上澄み部分を pH メータにて計測したところ、pH=14.6 の強アルカリ性を示した．

これは、犠牲陽極材に用いる金属が常に「反応する」状態に保つ必要があるためである．亜鉛の場合、図 4. 2. 1 に示す亜鉛の電位・pH 図⁹⁾より、pH が 12 以下になると、「不動域」つまり、金属亜鉛表面に酸化被膜が形成し、金属表面が耐食性を持つようになってしまい、腐食反応つまり防食電流を供給する反応ができなくなり、犠牲陽極材としての役割を果たせなくなってしまう．

したがって、バックフィル材などを用いて、金属の環境条件が電位 - pH 図の「腐食域」の領域に留まるようにする必要がある．そのため、亜鉛を用いた犠牲陽極材では、水酸化リチウムな

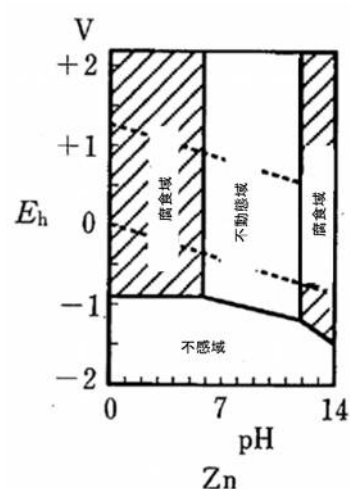


図 4. 2. 1 亜鉛の電位・pH 図

どの高 pH を保持する薬剤をバックフィル材に混和し、常に高い pH を保つような工夫をしている。

一方、金属亜鉛の密度は 7.14g/cm^3 であり、犠牲陽極反応で生成する水酸化亜鉛の密度は 3.05g/cm^3 であることから、防食電流を供給する反応後の金属亜鉛は体積膨張することになる。これを抑制するため、バックフィル材は空隙が多い構造となっている。図 4.2.2 にバックフィル材と JIS R5201「セメントの物理試験方法」で示される W/C=50%、砂/セメント比=3/1 のモルタルを 28 日間水中養生したもの（水銀ポロシメータによる細孔構造を示す）。

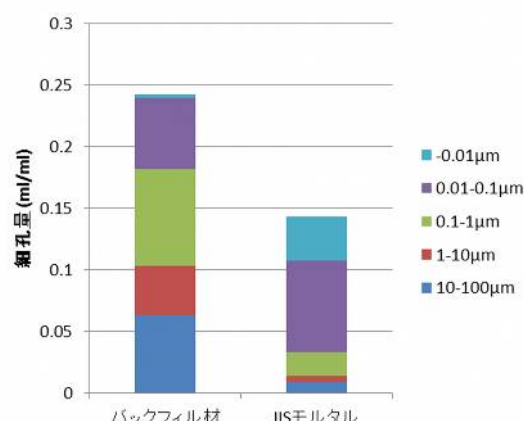


図 4.2.2 バックフィル材と JIS モルタルの細孔構造

バックフィル材の細孔構造は JIS モルタルと比較して、細孔径が $10\text{-}100\mu\text{m}$ および $1\text{-}10\mu\text{m}$ の粗大な空隙が格段に多く、総細孔量も JIS モルタルの 1.7 倍程度となっており、バックフィル材の細孔構造は一般的なモルタルと比較してかなり空隙が多い構造であることがわかる。また、バックフィル材の細孔溶液は $\text{pH}=14$ 以上の強アルカリの水酸化リチウムの飽和溶液として存在する。そのため、亜鉛の酸化物に過飽和および沈殿が起こらず、バックフィル材の空隙を通り抜けることができる。さらに前述のようにバックフィル材は意図的に多孔性になっており、このような亜鉛の酸化物の移動を容易にする。このようにして、犠牲陽極材中の亜鉛が電流を出力し、亜鉛の酸化物を生成してもバックフィル材が割れるようなことは起こらず、常に高アルカリ性の細孔溶液と接することができ、連続的に亜鉛が活性化した状態を保持し続けることができるとされている¹⁰⁾。

4.2.2 試験方法

(1) 供試体作製方法

供試体としては図 4.2.3 に示すように、部分断面修復を模擬し、コンクリートに断面修復材を打ち継ぐような形で $100\times 100\times 1000\text{mm}$ 供試体を作製した。供試体は、断面修復材内部の鉄筋 No.1 に犠牲陽極材を配する【内部設置供試体】、躯体コンクリート側の鉄筋 No.2 のかぶり側に断面修復材で犠牲陽極材を取り付ける【外部設置供試体】および犠牲陽極材を設置しない【設置なし供試体】の 3 種類を作製した。内部には 10 本の分割鉄筋を配しており、分割鉄筋間と端部はエポキシ樹脂を充填し、電氣的に絶縁した。各分割鉄筋の端部にはリード線を A/B の 2 系統接続した。A 系統は接続および切断が可能となし、B 系統には電気化学的測定が可能な端子を取り付けた。こうすることで、電流などの測定の際、A 系統を接続したまま、B 系統に測定機材をセットし、その後 A 系統を切断することで、電流を測定した。この方法により、供試体に流れる電流を一度も切断することなく分割鉄筋間の電流の測定が可能となる。

供試体の作製は 20°C の恒温室内にて実施した。コンクリートを打設後、翌日に脱型し、断面修復材を打設した。コンクリートと断面修復材との打継界面は、60 番のサンドペーパーで目粗し処

理した後、プライマーは使用せず水湿しのみを行い、断面修復材を打設した。さらに外部設置供試体については、断面修復材の打設の翌日に犠牲陽極材部を打設した。犠牲陽極材部とコンクリートとの打継界面の処理は、前述の方法と同じとした。

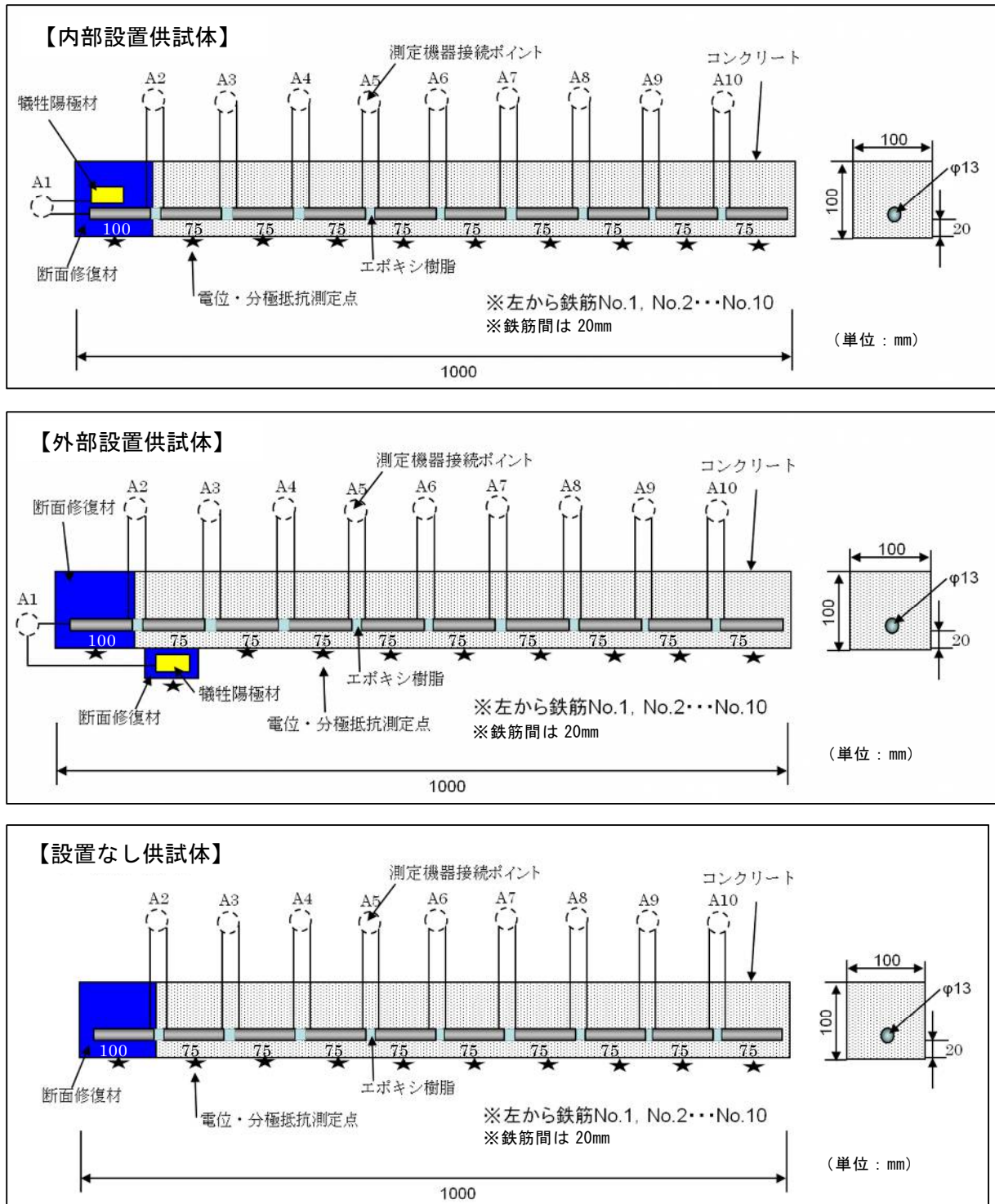


図 4. 2. 3 供試体概要図

供試体作製から 28 日間 20℃室内で乾燥養生を行った。養生期間内は分割鉄筋どうしの電氣的接続は行った（図 4.2.3 の A2～A10 を接続する）が、犠牲陽極材と鉄筋との接続は行わなかった。養生完了後、犠牲陽極材と鉄筋との接続を行った（図 4.2.3 の A1 を接続する）後、35℃、90%R.H.の恒温恒湿室内に供試体を静置し、試験を開始した。鉄筋腐食が激しくなる盛夏期の海岸線付近の RC および PC の鉄筋コンクリート構造物を想定し、高温多湿の 35℃、90%R.H.の環境条件を選定した。

供試体は同じ条件のものを 3 体ずつ作製した。実際に作製した内部設置供試体および外部設置供試体を、写真 4.2.3 および写真 4.2.4 に示す。また、作製した供試体の詳細を表 4.2.1 に示す。



写真 4.2.3 内部設置供試体



写真 4.2.4 外部設置供試体

表 4.2.1 作製供試体の試験条件

供試体名	暴露温度	供試体	躯体強度	躯体塩分	断面修復材
A21-10KG-PCM-35D	35℃ 90%RH	内部 設置	21N/mm ²	10kg/m ³	一般 PCM
A40-10KG-PCM-35D			40N/mm ²		
B21-10KG-PCM-35D		外部 設置	21N/mm ²		
B40-10KG-PCM-35D			40N/mm ²		
N21-10KG-PCM-35D		設置 なし	21N/mm ²		
N40-10KG-PCM-35D			40N/mm ²		

(2) 犠牲陽極材および分割鉄筋の電位および復極量

試験開始から、1 か月ごとに 6 ヶ月まで電位を測定した。電位測定の準備として、前日に濡れタオルをかけ、測定位置のコンクリートを十分に湿らせた。

電位の測定は、図 4.2.3 で示す★印の位置で照合電極を押し当て、鉄筋または犠牲陽極材の電位をデジタルマルチメータの電圧測定モードにて測定した。なお、使用したデジタルマルチメータの電圧の分解能は 0.1mV で、確度は±0.5%である。照合電極には飽和硫酸銅電極 (CSE 電極) を用いた。電位は犠牲陽極材と鉄筋を接続したままの状態の Eon 電位、犠牲陽極材と鉄筋とを切断した直後の Eio 電位および犠牲陽極材と鉄筋とを切断してから 24 時間後の Eof 電位を測定した。また、Eio 電位から Eof 電位の差を復極量として算出した。なお、犠牲陽極材を設置しない設置なし供試体は各分割鉄筋の自然電位 En を測定した。

(3) 分割鉄筋に流れるマクロセル電流

電位と同様に試験開始から、1 か月毎に 6 ヶ月まで測定した。電位の E_{on} 電位の測定後に測定を実施した。宮里らの研究¹¹⁾に従い、対象となる要素の鉄筋に流れ込む方向の電流をプラスとして、表面積で除することで各分割鉄筋に流れる電流密度を求めた。各鉄筋要素において電流密度が正の値の場合はアノードで、負の値の場合はカソードとなる。

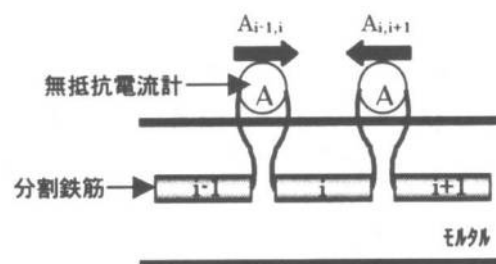


図 4.2.4 マクロセル電流の定義

(4) 分割鉄筋の分極抵抗およびコンクリート比抵抗

電位と同様に試験開始から、1 か月毎に 6 ヶ月まで測定した。宮里ら¹¹⁾の方法に従い、 E_{of} 電位を測定後、一度、全ての分割鉄筋間の接続を切断する。こうすることで、各分割鉄筋間での電流の出入りを無くし、各分割鉄筋の要素内では鉄筋電位が様となる。この状態で分極抵抗を測定した。分極抵抗およびコンクリート比抵抗は横田の研究¹²⁾に記載されている交流インピーダンス法を用いた携帯型腐食診断機で測定を行った。分極抵抗は鉄筋の自然電位を基準に $\pm 10\text{mV}$ の 2 種類の周波数（本研究では 10Hz と 10mHz ）の交流電圧を印加し、それぞれの応答電流および位相差を計測する。電圧と電流の比であるインピーダンス絶対値と位相差をもとに複素平面表示し、これらの 2 周波数の測定点を通る半円の径を 1.9 倍したものを見かけの分極抵抗 $R_p'(\Omega)$ とし、さらにこれに 2 重対極のうちセンター対極真下の鉄筋（長さ 4cm ）の上半分の表面積 $A(\text{cm}^2)$ をかけて単位面積当たりの分極抵抗値 $R_p = R_p' \times A (\Omega \text{cm}^2)$ とした。

(5) 分割鉄筋の分極曲線

分極曲線は、試験開始から 6 ヶ月時点で測定を行った。6 ヶ月での電位、電流および分極抵抗の測定が終了した供試体を 20°C 、 $60\%\text{RH}$ 室内にて 24 時間以上静置した供試体について測定を行った。対極はチタンメッシュ、参照電極は飽和硫酸銅電極（CSE 電極）を用いた。

写真 4.2.5 に示すように、対象となる鉄筋の長さに合わせたチタンメッシュをコンクリートのかぶり面に設置し、導通の確保のために十分に水でぬらしたセルロース繊維製の不織布をチタンメッシュに巻きつけた。参照電極はチタンメッシュの中央に設置した。

分極曲線の測定にはポテンショスタット（北斗電工株式会社製：電気化学測定システム HZ7000）を用いて測定した。測定は、まず測定対象となる鉄筋（もしくは犠牲陽極材）の自然電位を測定し、自然電位からカソード側に $40\text{mV}/\text{min}$ の割合で既往の文献¹³⁾を参

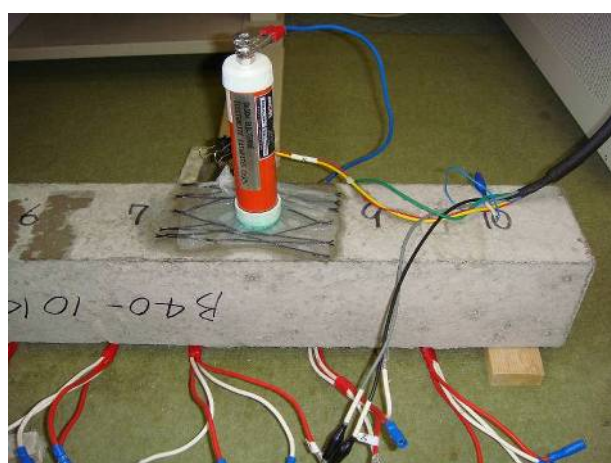


写真 4.2.5 分極曲線測定状況

考に、 200mV 程度分極させることとした。その後、元の自然電位を 5 分間保持し、その後、ア

ノード側に同じく 40mV/min の割合で 200mV 程度分極させた時の鉄筋に流れる電流の電流密度と電位の関係を測定開始から 1 秒ごとにプロットした。

(6) 鉄筋腐食状況

試験開始から 6 か月目の測定が終了した供試体について、供試体を割裂して鉄筋を取り出した。供試体を割裂した状態で鉄筋の腐食状況について外部観察を行った。

(7) 鉄筋腐食量

前記の鉄筋腐食状況の外部観察を行った供試体から各々の分割鉄筋を取り出し、エポキシ樹脂およびリード線を取り外した。その後、既往の研究¹⁴⁾にしたがって 10% のクエン酸水素二アンモニウム水溶液を 60℃ の恒温箱に 24 時間静置し、鉄筋表面の錆を溶解させた後、水洗いし乾布で表面を拭き取り、鉄筋質量を計測した。

分割鉄筋の作製時に各々の分割鉄筋の質量をあらかじめ計測しておき、試験前の鉄筋質量から差し引くことで鉄筋質量減少量を求め、試験前の鉄筋質量に対する鉄筋質量減少量の割合を求めた。また、供試体の作製と同時にあらかじめ本試験で用いる同じ仕様の分割鉄筋について、塩化物イオンを混和していないコンクリート中に埋設した供試体を作製しておき、本試験と同時に取り出したものについても同様の試験を行い、得られた質量減少率から差し引いた値を鉄筋腐食率とした。

4.2.3 試験結果

(1) 犠牲陽極材および鉄筋の電位

躯体コンクリートの圧縮強度が 21N/mm² のシリーズの Eon 電位および Eof 電位の計測結果を図 4.2.5～図 4.2.7 に示す。各電位の値は、3 体の供試体の平均値である。なお以下、電位の記述については特に断りがない限り、飽和硫酸銅（CSE）電極基準である。

なお、図中の横軸は電位の測定箇所を示しており、ZN は犠牲陽極材、No.1～No.10 は図 4.2.3 で示した各分割鉄筋に対応する。

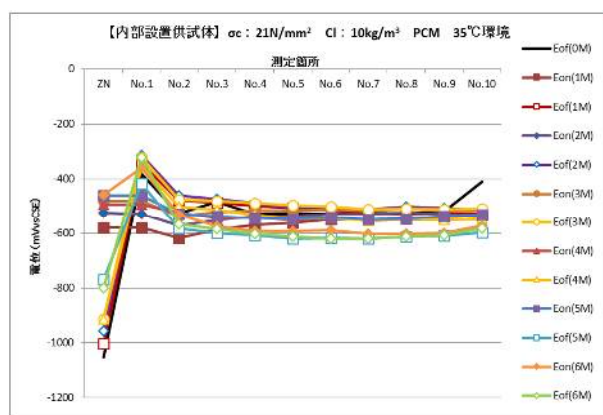


図 4.2.5 A21-10KG-PCM-35D の Eof, Eon 電位

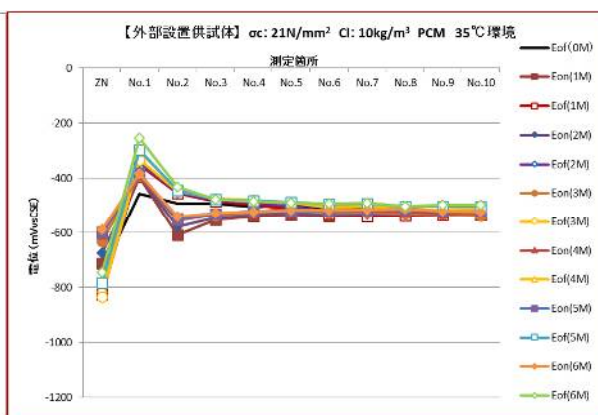


図 4.2.6 B21-10KG-PCM-35D の Eof, Eon 電位

図 4.2.5 より, 躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体では, 犠牲陽極材の Eof 電位が試験開始当初の -1000mV から徐々に貴側に移行し, 6 か月の時点では, -800mV と 200mV 程度貴になった。

これは, 材齢の経過に伴い, 犠牲陽極材の内部まで乾燥が進行することにより, 犠牲陽極である亜鉛金属の反応活性度が低下した可能性¹⁰⁾や, 亜鉛金属の酸化反応が進行したことにより, 亜鉛金属表面に多少なりとも酸化被膜が形成されている可能性などが考えられる。

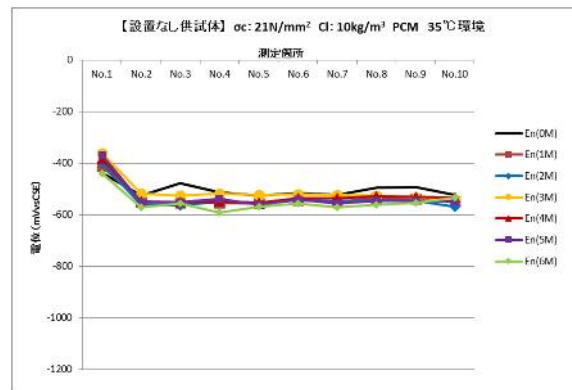


図 4.2.7 N21-10KG-PCM-35D の Eof 電位

また, 鉄筋の Eof 電位は試験開始から 3 か月までは, 材齢の経過に伴う供試体の乾燥や緻密化などの影響で試験開始前から徐々に貴側に移行していたが, 4 か月以降は逆に卑側に移行していき, 6 か月の時点では試験開始前よりも卑側となった。これは, 3 か月以降に鉄筋の腐食が進行し, 電位が卑側に移行したためと考えられる。これは, 後述する分極抵抗値が CEB (ヨーロッパコンクリート委員会) で提案されている鉄筋腐食の判定基準「激しい, 高い腐食速度」となる $26\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を下回る時期ともほぼ一致している。

鉄筋の Eon 電位について, 犠牲陽極材直近の鉄筋 No.1 については犠牲陽極材の Eon 電位が貴側に移行するため, 試験期間を通じて徐々に貴側に移行している。躯体コンクリート側の鉄筋 No.2 以降については, 試験開始から 4 か月までは Eof 電位よりも卑側であるが, 5 か月以降は一部が Eof 電位よりも貴側になる鉄筋も出てきている。Eof 電位は ASTM C876 「Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete」において, 90% 以上の確率で腐食があるとされる -350mV よりも卑な値であることから, 6 か月時点では躯体コンクリート中の鉄筋についてはほとんど防食効果がみられない状況と考えられる。

供試体 A21-10KG-PCM-35D の条件においては, 一つの犠牲陽極材から供給される電流量では, 継続的な防食効果が得られない可能性が高いものと考えられる。

図 4.2.6 より, 躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の外部設置供試体では, 犠牲陽極材の Eof 電位は, 躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体と同様に試験開始当初の電位から徐々に貴側に移行するが, 6 か月の時点での移行量は -860mV が -750mV と 100mV 程度と内部設置供試体に比較して移行量が小さい。これは, 犠牲陽極材を外部に取り付けることで, 犠牲陽極材が外部環境の影響を受けやすくなり, 設置環境が $35^\circ\text{C}90\%\text{R.H.}$ とかなり湿度の高い条件であることから, 犠牲陽極材内部までの乾燥の影響が小さくなったためと考えられる。

鉄筋の Eof 電位は, 試験開始前の電位よりも若干貴側に移行し, 特に鉄筋 No.1 と No.2 の Eof 電位は明らかに貴側に移行している。6 か月経過時点でも, 試験開始前よりも卑側になることはなく, 内部設置供試体よりも高い防食効果を維持しているものと考えられる。

鉄筋の Eon 電位は, 犠牲陽極材を鉄筋 No.2 の直近に取り付けているため, 鉄筋 No.2 が他の分割鉄筋に比べて大きく卑側に分極され, 6 か月経過時点でもその効果は持続している。

断面修復工法では、前述のように躯体コンクリート側の鉄筋がマクロセル腐食電流により腐食が進行する懸念が高く、最もその懸念が高いのは打継直近の鉄筋 No.2 である。したがって、外部設置供試体のように犠牲陽極材を躯体側の鉄筋の直近に取り付けることにより、同じ犠牲陽極材を用いても断面修復材内部に設置する内部設置供試体よりも効果的に鉄筋が防食できる可能性があることを示しているものと考えられる。

図 4.2.7 より、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の設置なし供試体では、En 電位は、試験開始前の電位から試験期間を通じて、徐々に卑側に移行してきている。自然電位の値は $-500\sim 600\text{mV}$ であり、ASTM C876 の基準に照らしても、90%以上の腐食確率で推移しており、試験期間を通じて鉄筋腐食の進行が伺える。

次に、内部設置供試体と外部設置供試体の復極量を図 4.2.8～図 4.2.9 に示す。なお、Eof が Eio よりも卑側の場合、復極量はマイナスとして示した。

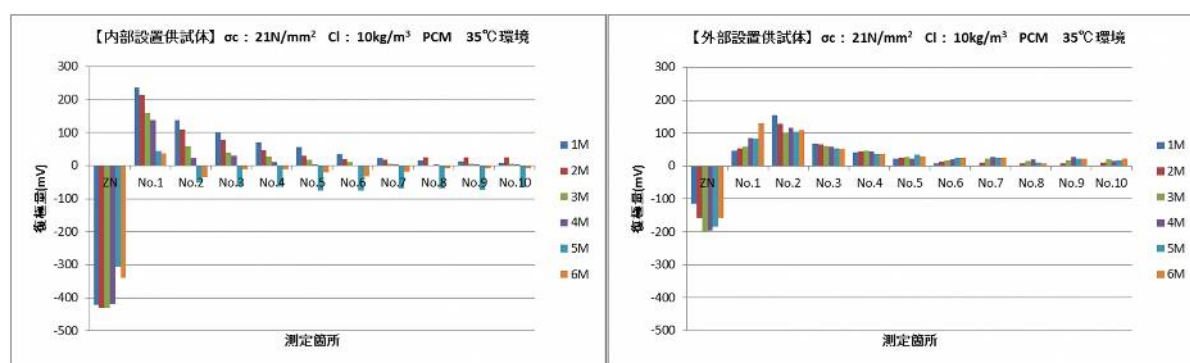


図 4.2.8 A21-10KG-PCM-35D の復極量

図 4.2.9 B21-10KG-PCM-35D の復極量

図 4.2.8 より、内部設置供試体において、犠牲陽極材の復極量（電位差）は当初 -400mV であったものが 6 か月後も -300mV と概ね同程度の値を維持しており、犠牲陽極材としての性能は当初の性能をほぼ維持しているものと考えられる。一方、躯体コンクリート中の鉄筋 No.2～No.10 の復極量は、試験開始直後は鉄筋 No.2 において 100mV 以上の復極量が認められ、概ね 4 か月程度までは復極量はプラスの値を維持していたものの、5 か月以降は復極量がマイナスとなり、防食効果が見られないという結果となった。断面修復材中の鉄筋 No.1 についても、復極量は減少している。

これは、躯体コンクリート中の塩化物イオン混和量が 10kg/m^3 と、水/セメント比が適用範囲外ではあるが土木学会「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」に定められる腐食発生限界塩化物イオン濃度 1.63kg/m^3 の 6 倍にも達する量を混和していることに加え、供試体の設置環境が 35°C と鉄筋の腐食反応を大きく促進させる環境であることから、鉄筋のマクロセル腐食に加えて、各分割鉄筋のミクロセル腐食も進行することが想定される。

今回用いた犠牲陽極材は、試験開始当初は打継界面付近の鉄筋 No.2 および No.3 では 100mV の復極量を示しており、所定の防食性能を発揮した。しかし、試験期間が経過するにつれ、鉄筋の腐食反応が卓越し、結果として 6 か月時点では復極量が認められない状況となった。以上のこ

とから、供試体 A21-10KG-PCM-35D の条件においては、一つの犠牲陽極材から供給される電流量では、継続的な防食効果が得られない可能性が高いものと考えられる。

図 4.2.9 より、外部設置供試体において、犠牲陽極材の復極量（電位差）は、 $-150\sim-200\text{mV}$ を維持している。内部設置供試体に比べて電位差は小さい値であるが、これは犠牲陽極材を外部に設置したことにより、犠牲陽極材を接続した場合、鉄筋との合成電位が形成されるが、合成電位の形成に最も影響を与えと考えられる犠牲陽極材の直近の鉄筋 No.2 の電位は、断面修復材中の鉄筋 No.1 である内部設置供試体に比べて卑側の値のため、接続時の E_{on} 電位は内部設置供試体に比べて卑側になると考えられる。そのため、外部設置供試体の犠牲陽極材の復極量は内部設置供試体に比べて小さくなるものと考えられる。

一方、鉄筋の復極量は、断面修復材中の鉄筋 No.1 および躯体コンクリート中の鉄筋 No.2 とともに 6 か月経過後も 100mV 以上の復極量を維持している。躯体コンクリート中のその他の鉄筋 No.3~10 についても復極量はプラス側である。これは、まず犠牲陽極材を鉄筋 No.2 の外側に設置することにより、犠牲陽極材に直近の鉄筋 No.2 に多くの防食電流が供給されることが考えられる。さらに外部に設置することにより、犠牲陽極材と躯体コンクリート内の鉄筋の間に存在するポリマーセメントモルタルの厚みが断面修復材内部に設置するよりも薄くなるため、効率よく電流を供給できるためではないかと推測される。つまり、内部設置供試体よりも外部設置供試体の方が、犠牲陽極材から躯体コンクリート中の鉄筋までの電流が流れる経路の電気抵抗が小さくなるためと考えられる。

次に 40N/mm^2 のシリーズの E_{on} 電位および E_{of} 電位を図 4.2.10~12 に示す。

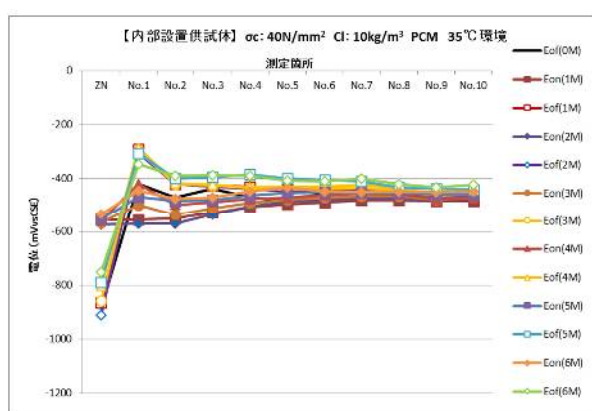


図 4.2.10 A40-10KG-PCM-35D の Eof, E_{on} 電位

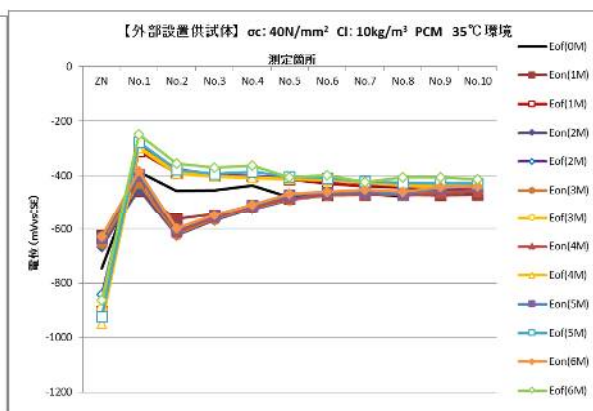


図 4.2.11 B40-10KG-PCM-35D の Eof, E_{on} 電位

図 4.2.10 より、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の内部設置供試体では、犠牲陽極材の E_{of} 電位は、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体と同様に、試験開始当初の -900mV から徐々に貴側に移行し、6 か月の時点では、 -750mV と 150mV 程度貴になった。この理由については、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体と同

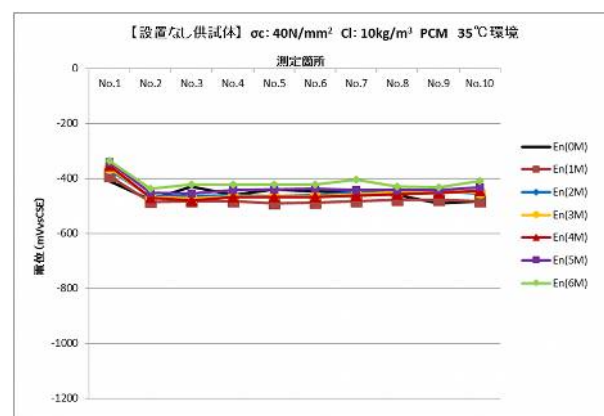


図 4.2.12 N40-10KG-PCM-35D の Eof, E_{on} 電位

様と考えられる。

鉄筋の Eof 電位は試験開始から徐々に貴側に移行し、6 か月の時点でも継続的に移行しているようである。躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体のように期間の途中で Eof 電位が卑側に移行することはなかった。但し、Eof 電位の値としては -400mV 程度であり、ASTM C876 の基準で 90%以上の腐食確率の領域であるので、腐食そのものは発生している可能性は高いと考えられる。躯体コンクリート強度が 40N/mm^2 の場合は、内部設置供試体では継続的な防食効果が得られなかった 21N/mm^2 の場合よりも犠牲陽極材の防食効果は 6 か月後も継続的に発揮しているものと考えられる。ここで、土木学会「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」に定められる腐食発生限界塩化物イオン濃度を 40N/mm^2 のコンクリート配合に当てはめて計算すると、 2.23kg/m^3 となり、 21N/mm^2 のコンクリートよりも高い濃度となる。したがって、同じ塩化物イオン量であれば、鉄筋腐食環境としては圧縮強度が高い（水セメント比が小さい）コンクリートの方が、相対的にマイルドな環境となるため、鉄筋の分極抵抗が高くなり、犠牲陽極材からの防食電流が小さい電流量でも、高い鉄筋の分極を得ることができ、防食性能を発揮することができるものと考えられる。

図 4.2.11 より、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の外部設置供試体では、犠牲陽極材の Eof 電位は、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の外部設置供試体と同様に試験開始当初の電位から徐々に貴側に移行するが、6 か月の時点での移行量は -950mV が -850mV と 100mV 程度であり、 21N/mm^2 シリーズと同様に内部設置供試体に比較して移行量が小さい。これも設置環境の影響を受けやすい外部設置型であるため、 35°C 90% R.H. とかなり湿度の高い条件であることから、犠牲陽極材内部までの乾燥の影響が小さくなったためと考えられる。

鉄筋の Eof 電位については、試験開始前の電位よりも若干貴側に移行するが試験期間を通じてほぼ同じであった。

鉄筋の Eon 電位は、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の外部設置供試体と同様に、犠牲陽極材を鉄筋 No.2 の直近に取り付けているため、鉄筋 No.2 が他の分割鉄筋に比べて大きく卑側に分極され、6 か月経過時点でもその効果は維持されている。 21N/mm^2 シリーズと同様に、外部設置供試体のように犠牲陽極材を躯体側の鉄筋の直近に取り付けることにより、同じ犠牲陽極材を用いても断面修復材内部に設置する内部設置供試体よりも効果的に鉄筋が防食できる可能性があることを示しているものと考えられる。特に躯体コンクリート側の鉄筋 No.2 の防食効果に差が出てくるものと考えられる。

図 4.2.12 より、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の設置なし供試体の躯体コンクリート中の鉄筋の En 電位は、多少上下するが、概ね -450mV 程度であるので、鉄筋腐食は発生しているものと考えられる。一方、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の内部設置供試体と外部設置供試体の 6 か月時点における Eof 電位は、鉄筋 No.2～4 は -400mV よりも貴側にあり、これらの鉄筋の腐食環境は改善する傾向にあるようである。

次に躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の内部設置供試体と外部設置供試体の復極量を図 4.2.13～図 4.2.14 に示す。

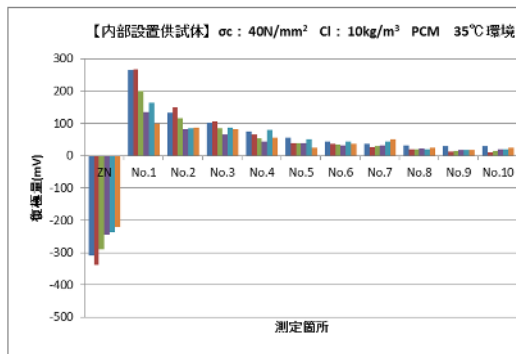


図 4. 2. 13 A40-10KG-PCM-35D の復極量

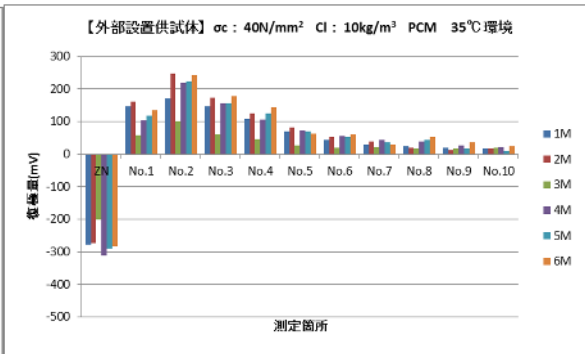


図 4. 2. 14 B40-10KG-PCM-35D の復極量

図 4. 2. 13 より、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の内部設置供試体において、犠牲陽極材の復極量（電位差）は当初 300mV であったものが 6 か月後は 200mV と若干小さくなった。概ね犠牲陽極材としての性能は当初の性能を維持しているものと考えられる。

一方、躯体コンクリート中の鉄筋 No.2～No.10 の復極量は、徐々に低下する傾向を示している。特に犠牲陽極材に近い鉄筋 No.1 および No.2 において低下傾向は明らかで、鉄筋 No.2 においては当初 100mV 以上の復極量が認められるが、4 か月以降は 100mV を切っている。しかし、6 か月においても復極量としては鉄筋 No.10 でもプラスの値となっており、コンクリート強度が 21N/mm^2 のシリーズに比べて高い防食効果を維持しているものと考えられる。

図 4. 2. 14 より、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の外部設置供試体において、犠牲陽極材の復極量（電位差）は、試験期間を通じて 3 か月後の値を除き、約 300mV と同程度の値となっている。3 か月後の値が小さくなった理由については不明であるが、供試体を設置している $35^\circ\text{C}90\%$ R.H.の恒温恒湿室を機械修理のため 5 日ほど停止した時期と重なっており、犠牲陽極材が外部環境に影響を受け、乾燥の影響を受けた可能性がある。

鉄筋の復極量については、前述の犠牲陽極材の復極量が小さくなった 3 か月後の値を除き、6 か月後まで概ね当初の復極量を維持している。特に躯体コンクリート中の鉄筋は No.2～No.4 まで復極量 100mV を示しており、犠牲陽極材を断面修復材内部に設置する内部設置供試体よりも遠くの鉄筋まで防食効果を発揮しているものと考えられる。

同じ外部設置供試体で躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 のものと比較しても、 100mV の復極量を得る鉄筋は No.2 から No.4 まで防食効果の範囲が広くなり、鉄筋 No.2 の復極量を比べると 100mV が 200mV まで大きくなっており、同じ鉄筋位置において高い防食効果も示すことがわかった。以上のことから、躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 と 40N/mm^2 のものを比較すると、 40N/mm^2 の方が高い鉄筋防食効果を示す可能性が高いものと考えられる。

(2) 分割鉄筋に流れるマクロセル電流

躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 シリーズの分割鉄筋に流れるマクロセル電流を電流密度で整理したものを図 4. 2. 15～図 4. 2. 17 に示す。

図中、内部設置供試体および外部設置供試体の正の値は犠牲陽極材からの防食電流を受け取り、防食側にあることを示す。設置なし供試体については正の値はアノード側、負の値はカソード側にあることを示す。

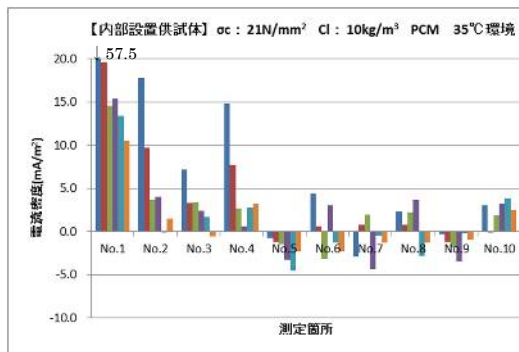


図 4.2.15 A21-10KG-PCM-35D のマクロセル電流密度

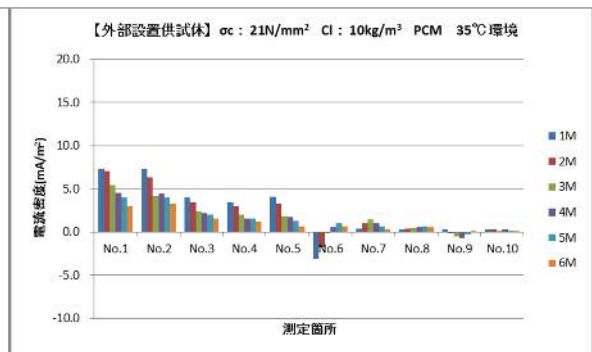


図 4.2.16 B21-10KG-PCM-35D のマクロセル電流密度

図 4.2.15 より、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体のマクロセル電流密度は、試験開始当初は鉄筋 No.1 において 50mA/m^2 以上の高い防食電流が供給されているが、2 か月以降は急激に電流密度が減少し、6 か月時点で 10mA/m^2 程度となっている。躯体コンクリート中の鉄筋も同様の傾向を示しており、鉄筋 No.2 では、当初 18mA/m^2 程度の防食電流密度であったが、6 か月後ではほぼゼロに近い電流密度となっている。躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体の 6 か月時点においては、躯体コンクリート中の鉄筋 No.2～10 には防食に効果的な電流は供給できず、No.5, 6, 7, 8 の各鉄筋においてはマクロセル電流密度も腐食側の値となっている。

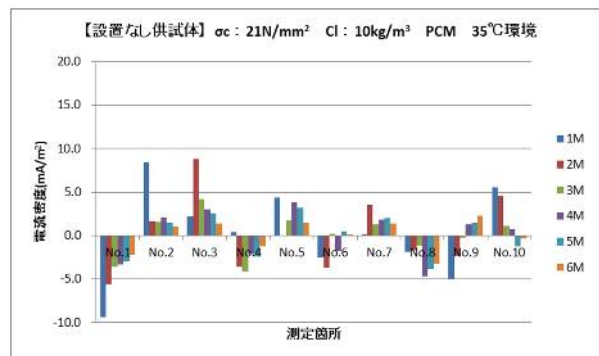


図 4.2.17 N21-10KG-PCM-35D のマクロセル電流密度

図 4.2.16 より、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の外部設置供試体のマクロセル電流密度は、内部設置供試体に比べて試験開始時の防食電流密度は小さい値であるが、6 か月時点でも鉄筋 No.8 まで防食側の電流密度を示しており、防食効果の継続性という点では優れているものと考えられる。

試験開始から 1 か月と 2 か月の鉄筋 No.6 は腐食側の電流密度となっているが、なぜこの時点で腐食側の電流密度になったのかについては犠牲陽極材から供給される電流が、躯体コンクリート側の鉄筋だけでなく、比抵抗が高いため鉄筋 No.2 より少ない電流が分配されると考えられる断面修復材内部の鉄筋 No.1 にも多く防食電流が供給されており、その分鉄筋 No.6 が腐食側となってしまった可能性などが推定される。

図 4.2.17 より、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の設置なし供試体のマクロセル電流密度は、試験期間を通じて各分割鉄筋でアノードとカソードが入れ替わるような挙動を示している。断面修復材内部の鉄筋 No.1 と躯体コンクリートの鉄筋 No.2 について、2 章で概説したマクロセル腐

食理論では前者がマクロカソード，後者がマクロアノードとなるが，本試験でもそのようになっている．加えて鉄筋 No.3 もマクロアノードとなっていて，鉄筋のマクロセル腐食が懸念される状況になっていることが伺える．

一方，犠牲陽極材を設置した躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体および 外部設置供試体のマクロセル電流密度は，鉄筋 No.2 および No.3 においては，少なくとも試験開始直後は防食側の電流密度になっており，これらのマクロセル腐食は抑制できているものと考えられる．

次に躯体コンクリート強度が 40N/mm^2 シリーズのマクロセル電流密度を図 4. 2. 18～20 に示す．

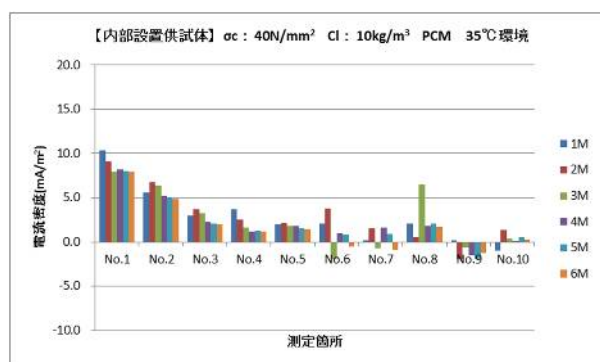


図 4. 2. 18 A40-10KG-PCM-35D のマクロセル電流密度

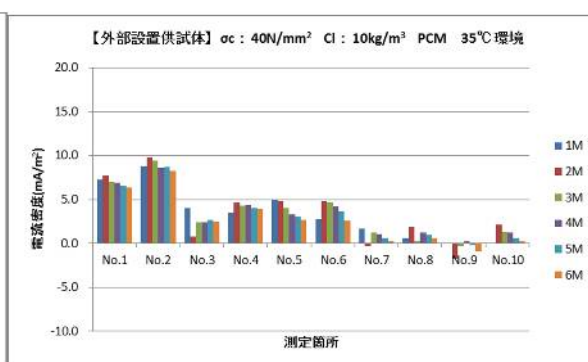


図 4. 2. 19 B40-10KG-PCM-35D のマクロセル電流密度

図 4. 2. 18 より，躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の内部設置供試体のマクロセル電流密度について，躯体コンクリート中の鉄筋では No.5 までは 6 か月の試験期間を通じて防食側の電流密度となっており，マクロセル腐食が懸念される打継ぎ界面近傍の鉄筋 No.2 や No.3 のマクロセル腐食を抑制しているものと考えられる．躯体コンクリート中の鉄筋 No.6～10 では一部の期間で腐食側のマクロセル電流密度がみられ，躯体コンクリート中の鉄筋の防食範囲は鉄筋 No.5 までとみなすことが可能と考えられる．躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体に比べてより広範囲により長い期間防食電流が供給されており，躯体コンクリート強度が 40N/mm^2 の方が効果的な防食効果が得られるようである．

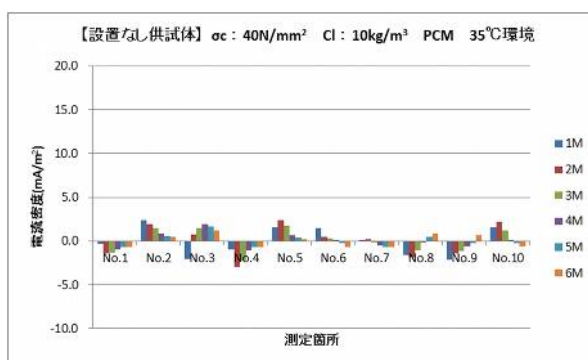


図 4. 2. 20 N40-10KG-PCM-35D のマクロセル電流密度

図 4. 2. 19 より，躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の外部設置供試体のマクロセル電流密度について，同じコンクリート強度の内部設置供試体よりもさらに広い範囲となる鉄筋 No.6 までが，6 か月の試験期間を通じて防食側の電流密度となっている．これは犠牲陽極材を躯体コンクリートの外部に設置することにより，より効果的に躯体コンクリート側の鉄筋に防食電流を供給できているためと考えられる．また，躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の外部設置供試体と比べても，例えば鉄筋 No.5 においては，躯体コンクリート強度 21N/mm^2 のものが 6 ヶ月後における防食電

流密度は 1.0mA/m^2 以下なのに対して、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 では 2.0mA/m^2 以上の値を示しており、より広範囲により高い電流密度を供給できることが確認できる。

図 4.2.20 より、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の設置なし供試体のマクロセル電流密度は、躯体強度 21N/mm^2 のものと同様に試験期間を通じて各分割鉄筋でアノードとカソードが入れ替わるような挙動を示している。躯体コンクリートの鉄筋 No.2 も同様にマクロアノードとなるが、腐食電流密度の値は最大でも 3.0mA/m^2 以下であり、最大値が 8.0mA/m^2 以上のマクロセル腐食電流密度を示す躯体コンクリート強度 21N/mm^2 のものに比べれば、小さな値となっている。

(3) 分割鉄筋の分極抵抗

躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 シリーズの分割鉄筋の分極抵抗を測定した結果を図 4.2.21～図 4.2.23 に示す。

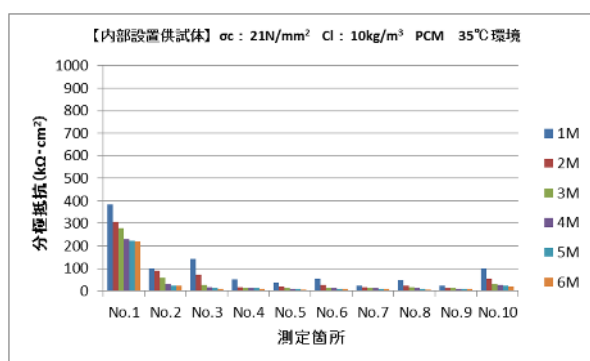


図 4.2.21 A21-10KG-PCM-35D の分極抵抗

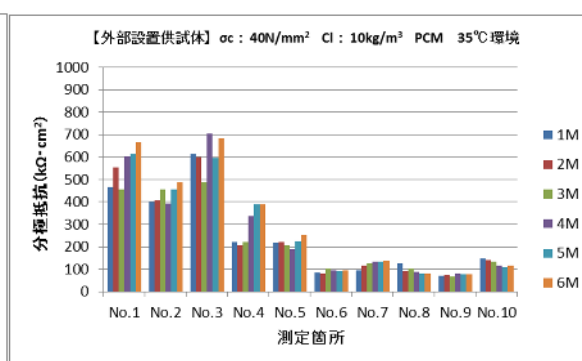


図 4.2.22 B21-10KG-PCM-35D の分極抵抗

図 4.2.21 より、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体の各鉄筋の分極抵抗は、試験開始から 1 か月では一部で $100\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を示すものがあるが、試験期間を通じて小さくなる傾向にあり、6 ヶ月後では、 $10\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 程度の値となっている。この値は表 4.2.4 に示す CEB (ヨーロッパコンクリート委員会) から出されている腐食速度の判定基準¹⁵⁾ では、「激しい、高い腐食速度」の判定であり、鉄筋腐食の進行が推定される。

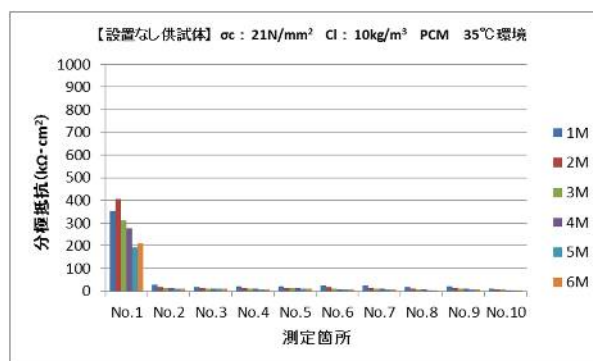


図 4.2.23 N21-10KG-PCM-35D の分極抵抗

表 4.2.4 CEB による腐食速度の判定基準

腐食速度測定値 I_{cor} ($\mu\text{A/cm}^2$)	腐食速度の判定	分極抵抗 R_{ct} ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)	侵食速度 PDY (mm/年)
0.1～0.2 未満	不動態状態 (腐食なし)	130～260 より大	0.0011～0.0023 未満
0.2 以上 0.5 以下	低～中程度の腐食速度	52 以上 130 以下	0.0023 以上 0.0058 以下
0.5 以上 1 以下	中～高程度の腐食速度	26 以上 52 以下	0.0058 以上 0.0116 以下
1 より大	激しい、高い腐食速度	26 未満	0.0116 より大

図 4.2.22 より、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の外部設置供試体の各鉄筋の分極抵抗は、躯体コンクリート中の鉄筋 No.2 および No.3 については、6 か月の試験期間を通じて CEB の基準によると「不動態状態」の値を維持しており、これらの鉄筋については高い防食効果を示しているものと考えられる。その他の躯体コンクリート内の鉄筋についても、おおむね $50\sim 100\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 程度の値を示しており、「低～中程度の腐食速度」となっている。前述の内部設置供試体や後述の設置なし供試体の分極抵抗の値は高い腐食速度を示しているのに対して、腐食速度が低く抑えられており、外部設置供試体の鉄筋腐食抑制効果が卓越しているものと考えられる。

図 4.2.23 より、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の設置なし供試体の各鉄筋の分極抵抗は試験期間を通して $10\sim 20\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 程度であり、CEB の基準に照らし合わせて鉄筋の腐食速度はかなり高いものと推察される。

次に躯体コンクリート強度が 40N/mm^2 シリーズの分割鉄筋の分極抵抗を測定した結果を図 4.2.24～図 4.2.26 に示す。

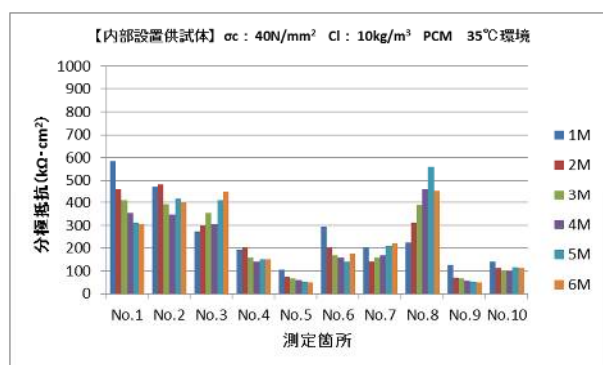


図 4.2.24 A40-10KG-PCM-35D の分極抵抗

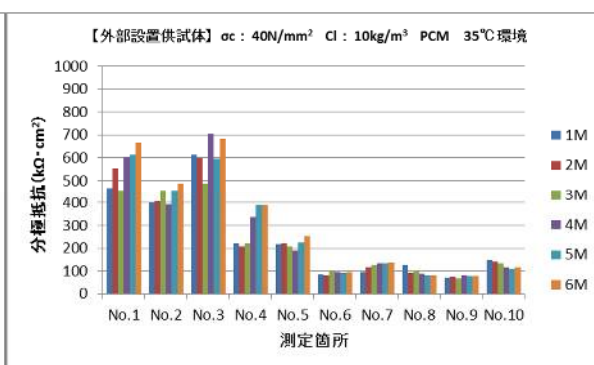


図 4.2.25 B40-10KG-PCM-35D の分極抵抗

図 4.2.24 より、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の内部設置供試体の各鉄筋の分極抵抗は、試験開始から 6 か月の試験期間を通じて、鉄筋 No.5, No.9 および No.10 を除く鉄筋では $100\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上の分極抵抗を示しており、良好な防食状態を示すものと考えられる。したがって、躯体コンクリート内部鉄筋の防食範囲は、鉄筋 No.4 まではおおむね良好な防食状態であると考えられる。鉄筋

No.5 以降の鉄筋においても、「低～中程度の腐食速度」の範疇であり、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体と比較すると、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の内部設置供試体の方が躯体コンクリート内の鉄筋の腐食速度は低く抑えられているものと考えられる。

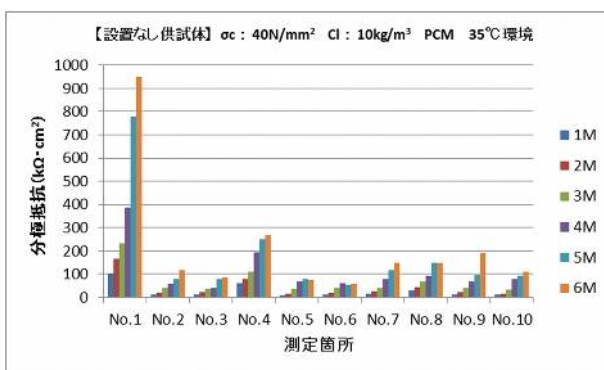


図 4.2.26 N40-10KG-PCM-35D の分極抵抗

図 4.2.25 より、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の外部設置供試体の各鉄筋の分極抵抗について、試験開始から 6 か月の試験期間を通じて、鉄筋 No.1 から No.5 までは、分極抵抗が $100\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上を示しており、内部設置供試体と同様に躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 の B21-10KG-PCM-35D よりも広範囲かつ高い分極抵抗を示す。また、躯体コンクリート強度が

21N/mm²のものと同様に躯体コンクリート強度が 40N/mm²の内部設置供試体と比べても、高い防食効果を示している。

鉄筋 No.6 以降の鉄筋においても、「低～中程度の腐食速度」の範疇に留まっており、後述の設置なし供試体と比較して、大きく腐食速度を抑制しているものと考えられる。

図 4.2.26 より、躯体コンクリート強度 40N/mm²の設置なし供試体の各鉄筋の分極抵抗について、躯体コンクリート中の鉄筋は、試験開始時はほとんどの鉄筋が 10 kΩ・cm²程度の分極抵抗であり、「激しい、高い腐食速度」となっているが、試験期間の経過に伴って、分極抵抗も徐々に増大する傾向を示しており、6 か月の時点では、全ての鉄筋で 50 kΩ・cm²以上の分極抵抗を示し、鉄筋の腐食速度も「低～中程度の腐食速度」まで抑制されている。これは材齢の経過に伴い、コンクリートの組織が緻密化したためと考えられる。躯体コンクリート 40N/mm²の条件であるので、水セメント比が 40%程度と比較的低く、未水和セメントが多く存在することが考えられ、試験期間中にその水和が進行したのではないかと考えられる。躯体コンクリート強度 21N/mm²では見られなかった傾向である。

(4) 分割鉄筋の実測分極曲線

供試体作製から 6 か月後における、躯体コンクリート強度が 21N/mm²の内部設置供試体の分割鉄筋の分極曲線を測定した結果を図 4.2.27 に示す。なお、各分極曲線は既往の文献¹⁶⁾を参考に、分極抵抗を測定した際に計測される抵抗値を用いて IR 補正を行ったものであり、凡例の最後の添え字は C：カソード、A：アノードであることを示す。

図 4.2.27 より、躯体コンクリート強度 21N/mm²の内部設置供試体の各分割鉄筋の分極曲線について、断面修復材内部の鉄筋 No.1 は、自然電位が -250mV 程度であり、分極も 1mA/m²以下の電流密度から開始されており、分極抵抗が高いことを示している。躯体コンクリート部の鉄筋 No.2～No.10 の分極曲線はほぼ同じ自然電位から開始されている。鉄筋 No.2 が最も低い電流密度で分極が得られる結果となっており、分極抵抗の結果とも傾向が一致する。一方、分極を得るのに最

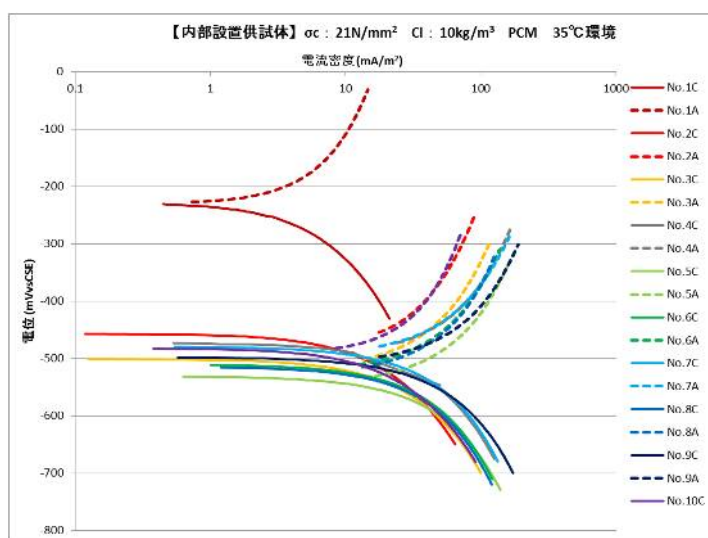


図 4.2.27 A21-10KG-PCM-35D の実測分極曲線

も高い電流密度が必要なものは鉄筋 No.5 および No.9 であり、これは分極曲線の測定直前に計測した測定開始から 6 か月後における分極抵抗の測定結果とも一致する。

ここで各鉄筋の酸素の還元反応 $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ によるカソード分極曲線の直線部分は比較的ばらつきは小さいようである。カソード分極曲線は酸素の還元反応に支配され、酸素の供給状況に影響は受けると考えられ、酸素の供給状況に大きな差が無ければ、鉄筋の腐食の難易には大きな影響は受けにくいものと考えられる。

一方、鉄の溶解反応 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ によるアノード分極曲線は、鉄筋の溶解反応に支配されるため、腐食環境に影響を受けるものと考えられる。腐食環境が厳しくなるほど、アノード平衡電位が卑側にシフトするため、カソード分極曲線とは電流密度が大きい箇所で交差し、したがって腐食電流密度も大きくなる。躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体においては、断面修復材中の鉄筋 No.1 のグループと躯体コンクリート中の鉄筋 No.2～10 の 2 つのグループにアノード分極曲線は分けることができると考えられる。

次に図 4.2.28 に実測分極曲線の一つ（例として No.3 鉄筋）と、既往の研究¹⁷⁾で示される理論曲線を比較したものを示す。ここではアノード分極の理論曲線は、勾配一定 (60mV/decade) とし、アノード実測分極曲線に接するように設定した。カソード分極の理論曲線も同様に、勾配一定 (-240mV/decade) とし、カソード実測分極曲線と接するように設定した。

アノード実測分極曲線は、理論曲線とのずれが大きくなっている。これはコンクリート中の鉄筋のアノード反応は、拡散律速になっているためと考えられる。拡散律速の際に起きている現象としては、溶解した鉄イオンや腐食生成物が鉄の表面に蓄積し、鉄の溶解反応つまりアノード反応を阻害していることが推測される。

一方、カソード実測分極曲線も同様にコンクリート中の酸素の拡散に支配されるが、理論曲線とのずれは小さく、本試験の測定条件ではカソード反応に要する鉄筋への酸素の供給が十分に行われていたものと考えられる。

以上のような手法で、アノードおよびカソード実測分極曲線に接するようにアノードおよびカソードの理論曲線を設定し、その交点を腐食電流密度 (i_{cor}) および腐食電位 (E_{cor}) として、躯体コンクリート強度

21N/mm^2 の内部設置供試体の各分割鉄筋の腐食電流密度を算出した。

躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体の各分割鉄筋について、図 4.2.28 の手法による腐食電流密度の算出値と、分極抵抗値の測定結果から算出した腐食電流密度を比較したものを図 4.2.29 に示す。分極抵抗値から腐食電流の算出は、横田らの研究¹⁸⁾に準拠して、式 (4.2.1) から求めた。但し、K 値は 0.026V とした。

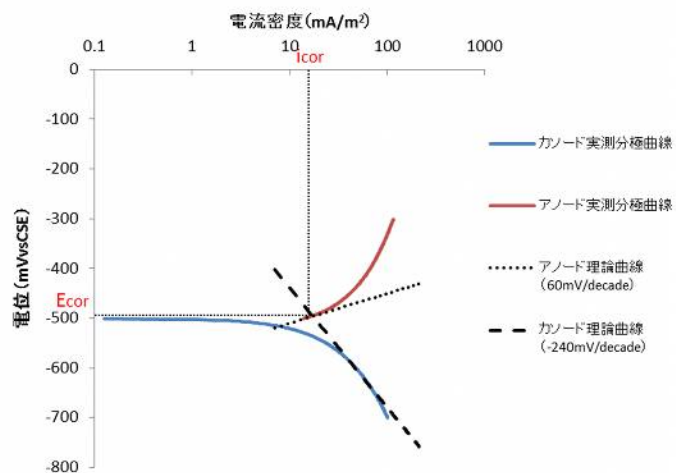


図 4.2.28 実測分極曲線と理論曲線との比較および腐食電流密度の算出手法

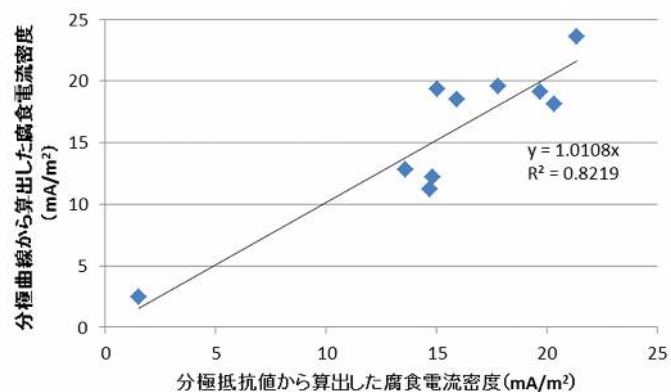


図 4.2.29 分極抵抗値および分極曲線から算出した腐食電流密度の比較

$$i_{cor} = K \cdot (1/R_p)$$

式 (4.2.1)

但し, i_{cor} : 腐食電流密度 (mA/m^2)

R_p : 分極抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)

K : 腐食電流密度と分極抵抗の逆数の比 (V)

図 4.2.29 より, 分極抵抗値から算出した腐食電流密度と図 4.2.27 に示した手法による実測分極曲線から算出した腐食電流密度は, ほぼ 1 対 1 の関係を示しており, 以下, 実測分極曲線から算出する腐食電流密度は, この手法により算出する。

図 4.2.30 より, 躯体コンクリート強度 $21\text{N}/\text{mm}^2$ の外部設置供試体の各分割鉄筋の分極曲線について, 断面修復材内部の鉄筋 No.1 は, 自然電位が -150mV 程度であり, 分極も $0.1\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の小さな電流密度から開始されており, 分極抵抗が高いことを示している。躯体コンクリート部の鉄筋 No.2~No.10 の分極曲線は $-400 \sim -500\text{mV}$ の自然電位から開始されている。

躯体コンクリート中の鉄筋では, 鉄筋 No.2, No.3, No.4, No.5 と犠牲陽極材に近い鉄筋が中でも低い電流密度で分極が得られる結果となっており, 試験開始から 6 か月後の分極抵抗の結果とも傾向が一致する。一方, 分極を得るのに高い電流密度が必要なものは犠牲陽極材から遠い鉄筋の No.6~No.10 であり, 試験開始から 6 か月後における分極抵抗の測定結果とも一致する。

図 4.2.31 より, 躯体コンクリート強度 $21\text{N}/\text{mm}^2$ の設置なし供試体の各分割鉄筋の分極曲線について, 断面修復材内部の鉄筋 No.1 のみ突出して $1\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の電流密度から分極が開始されており, 分極抵抗が高いことを示している。躯体コンクリート部の鉄筋 No.2~No.10 の分極は, 電流密度 $20 \sim 30 \text{mA}/\text{m}^2$ 程度から開始されている。

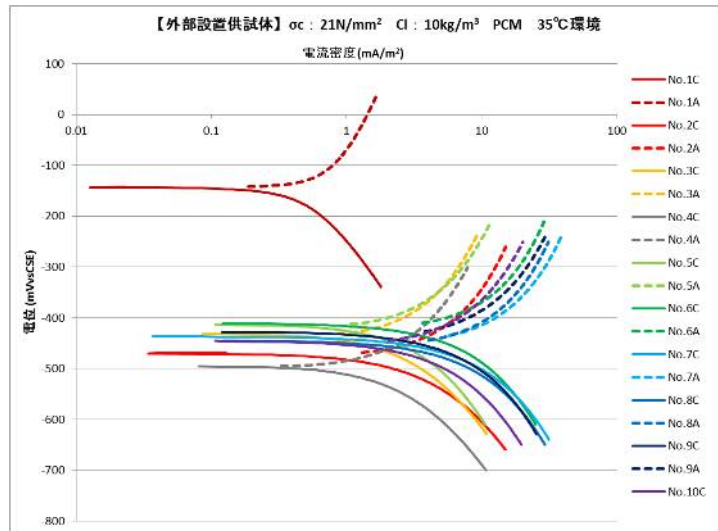


図 4.2.30 B21-10KG-PCM-35D の実測分極曲線

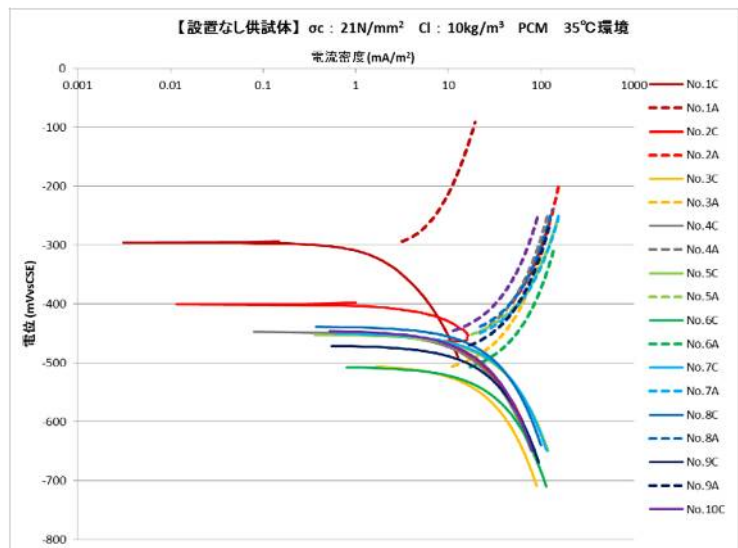


図 4.2.31 N21-10KG-PCM-35D の実測分極曲線

躯体コンクリート中の鉄筋 No.2～No.10 の分極曲線は躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体や外部設置供試体と比べてばらつきが小さい。これは、犠牲陽極材を設置していないため、腐食環境が No.2～No.10 の鉄筋間であまり差が無いためと考えられる。逆にいえば、犠牲陽極材を設置している内部設置供試体および外部設置供試体は犠牲陽極材に近い鉄筋が分極を得やすい側に分極曲線がシフトしており、犠牲陽極材を設置していない設置なし供試体に比べてこれらの鉄筋の腐食環境が改善されていることが示されているとも考えられる。これは、分極抵抗の測定結果とも一致する。

次に、躯体コンクリート強度が 40N/mm^2 シリーズの分割鉄筋の分極曲線を図 4.2.32～図 4.2.33 に示す。

図 4.2.32 より、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の内部設置供試体の各分割鉄筋の分極曲線について、断面修復材内部の鉄筋 No.1 は、自然電位が -200mV 程度であり、分極も 1mA/m^2 以下の電流密度から開始されており、分極抵抗が高いことを示している。躯体コンクリート部の鉄筋 No.2～No.10 の分極曲線はほぼ同じ -400mV の自然電位から開始されている。

躯体コンクリート中の鉄筋では、鉄筋 No.2, No.3 の犠牲陽極材に近い鉄筋が比較的電流密度で分極が得られる結果となっており、6 か月後の分極抵抗の結果とも傾向が一致する。また、分極抵抗の結果で犠牲陽極材からの距離が遠いにもかかわらず比較的高い分極抵抗値を示した鉄筋 No.8 がこれに続いて低い電流密度で分極が得られる結果となっており、分極抵抗の結果と良い相関が得られた。

図 4.2.33 より、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 の外部設置供試体の各分割鉄筋の分極曲線について、断面修復材内部の鉄筋 No.1 は、自然電位が -200mV 程度であり、分極も 1mA/m^2 以下の電流密度から開始されており、分極抵抗が高いことを示している。躯体コンクリート部の鉄筋 No.2～No.10 の分極曲線は、自然電位が一部貴側にシフトするものもみられ、鉄筋腐食環境が改善されていることが推測される。

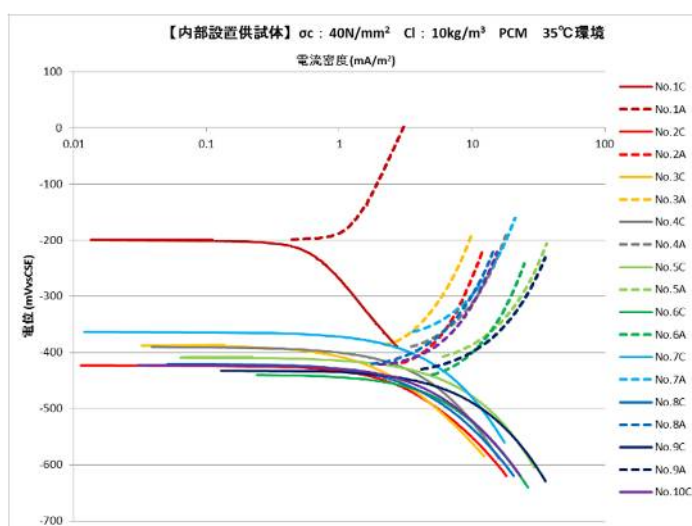


図 4.2.32 A40-10KG-PCM-35D の実測分極曲線

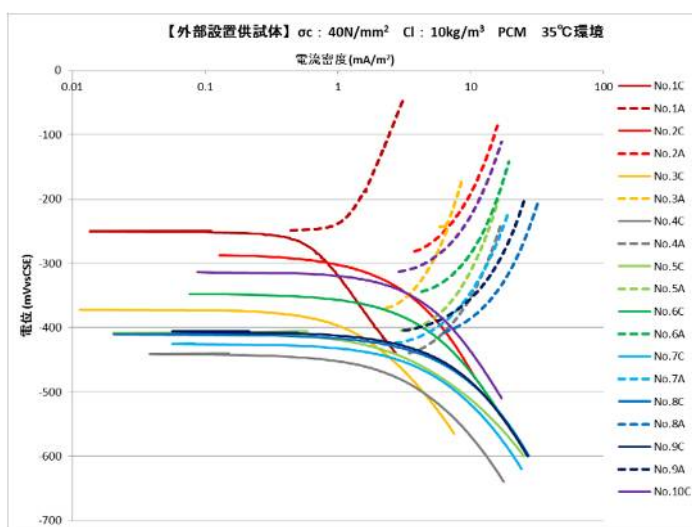


図 4.2.33 B40-10KG-PCM-35D の分極曲線

躯体コンクリート中の鉄筋では、鉄筋 No.2, No.3 の犠牲陽極材に近い鉄筋が比較的電流密度で分極が得られる結果となっており、6 か月後の分極抵抗の結果とも傾向が一致する。また、分極抵抗の結果で最も分極抵抗値が小さい値を示した鉄筋 No.8 および No.9 が、中でも最も分極が得にくい結果となっており、分極抵抗の結果とも良く一致する。

図 4.2.34 より、躯体コンクリート強度 40N/mm² の設置なし供試体の各分割鉄筋の分極曲線について、断面修復材内部の鉄筋 No.1 が最も低い電流密度から分極が開始されており、分極抵抗が高いことを示している。

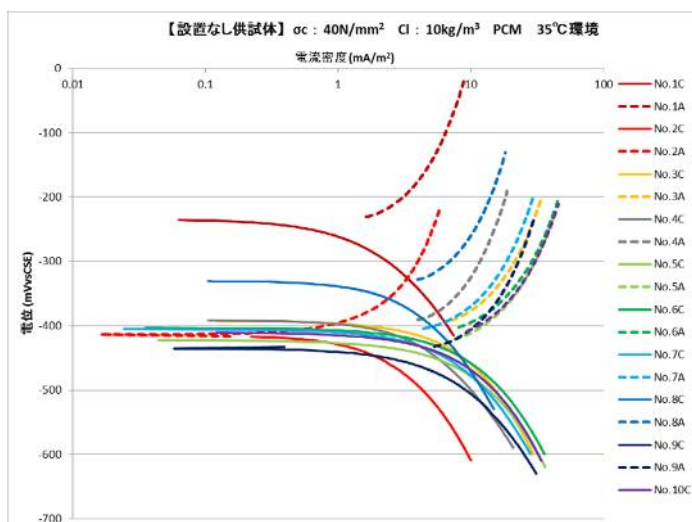


図 4.2.34 N40-10KG-PCM-35D の分極曲線

一方、躯体コンクリート部の鉄筋 No.2～No.10 について、躯体コンクリート強度 21N/mm² の設置なし供試体とは異なり、躯体コンクリート内部の鉄筋間で分極曲線にばらつきが生じている。

分極抵抗の測定結果より、分極抵抗値が比較的高い値を示した鉄筋 No.2, No.4, No.8 の分極曲線は他の躯体内部の鉄筋に比べて分極しやすい結果となっており、同じ躯体内部の鉄筋でも腐食環境に差が生じてきているものと考えられる。例えば、マクロセル電流密度の測定結果より、鉄筋 No.4 は試験期間を通じてマクロセルカソードとなっており、近傍の鉄筋が犠牲陽極材のように鉄筋 No.4 に電流を供給し、結果として鉄筋 No.4 の腐食環境が改善された可能性が考えられる。

次に、図 4.2.35 および図 4.2.36 に実測分極曲線から算出した各分割鉄筋の腐食電流のうち、躯体コンクリート 21N/mm² および 40N/mm² シリーズについて示す。

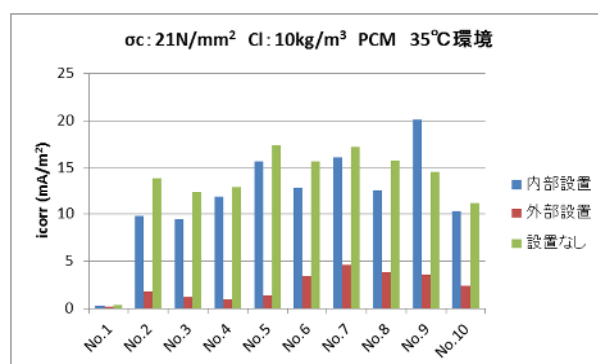


図 4.2.35 躯体コンクリート強度 21N/mm² シリーズの鉄筋腐食電流密度

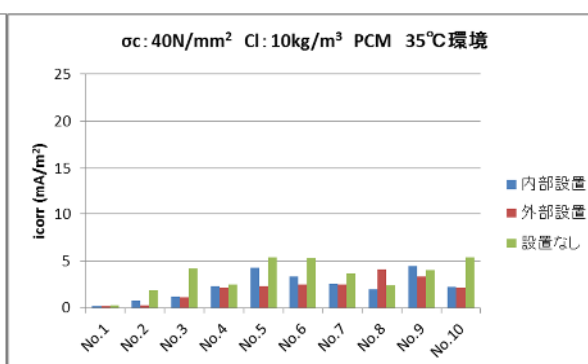


図 4.2.36 躯体コンクリート強度 40N/mm² シリーズの鉄筋腐食電流密度

図 4.2.35 より、躯体コンクリート 21N/mm² シリーズにおいて、内部設置供試体は設置なし供試体と比較して、鉄筋腐食電流密度に大きな差はなく、分極曲線を測定した時点では、躯体内の

鉄筋はすでに腐食が進行していることが推定される。

一方、外部設置供試体は他の2つの条件に比べて小さい鉄筋腐食電流密度となっていて、鉄筋の腐食抑制効果が認められるようである。特に犠牲陽極材の設置位置近傍の鉄筋 No.2～No.5 の腐食電流密度の抑制効果が高くなっている。

図 4.2.36 より、躯体コンクリート強度 40N/mm^2 シリーズにおいて、まず犠牲陽極材を設置していない設置なし供試体は躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 のものに比べて、腐食電流が全体として半分以下に抑えられており、躯体強度の違いが鉄筋の腐食環境に影響を与えていることが推測される。また、分極曲線や分極抵抗で他の鉄筋に比べて腐食環境が改善されていると推測された鉄筋 No.4 や鉄筋 No.8 については、鉄筋腐食電流においても比較的低い値となっており、これらの傾向と一致した。

躯体コンクリート強度 21N/mm^2 シリーズでは明確な腐食電流密度の差が出なかった内部設置供試体では、特に鉄筋 No.2 と No.3 において設置なし供試体と比べて明確な差が認められ、犠牲陽極材の効果により鉄筋腐食を抑制しているものと考えられる。

外部設置供試体においては、特に界面近傍の躯体コンクリート中の鉄筋である鉄筋 No.2 において腐食電流密度の抑制効果が高く、犠牲陽極材の外部設置による効果がよく表れているものと考えられる。

(5) 鉄筋腐食状況

次に、解体直後の供試体のうち、躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 シリーズのものの状況を写真 4.2.5 に示す。

内部設置供試体と設置なし供試体の躯体コンクリート内部の鉄筋はほぼ全面腐食となっている状況であった。それに対して、外部設置供試体は腐食が多くは見られず、特に鉄筋 No.2～No.5 あたりまではほとんど錆が見られない状況であり、高い鉄筋防食効果を発揮しているものと考えられる。なお、写真 4.2.6 に全面的に鉄筋腐食が見られた設置なし供試体の鉄筋 No.2 の表面の pH を pH 試験紙で簡易的に測定した状況を示す。

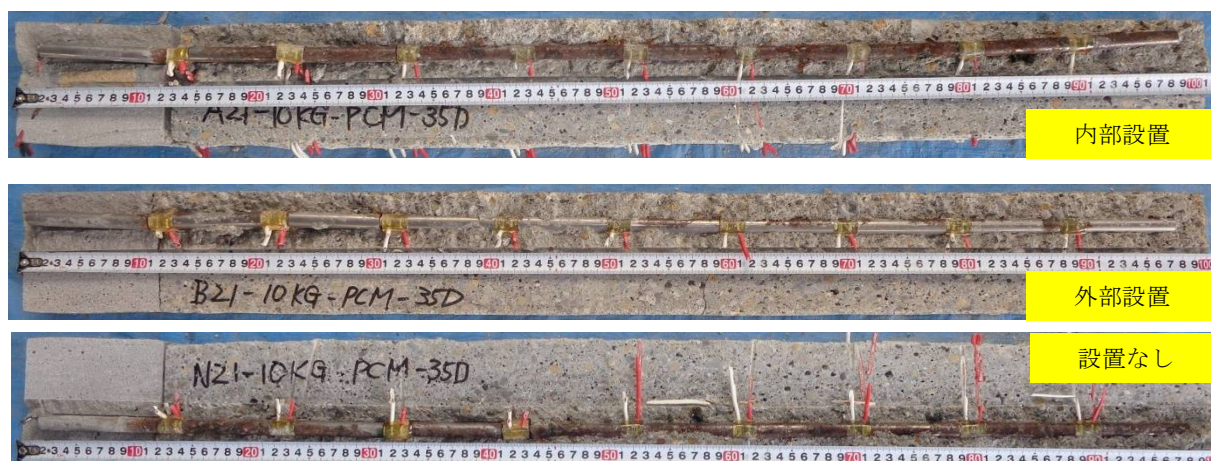


写真 4.2.5 躯体強度 21N/mm^2 シリーズの供試体解体直後の状況

写真 4. 2. 6 より，全面腐食が見られた設置なし供試体の鉄筋 No.2 の表面の pH はおよそ 6 程度まで低くなっており，激しい腐食状況が伺える。

次に，躯体コンクリート 40N/mm² シリーズの解体直後の供試体の状況を写真 4. 2. 7 に示す。



写真 4. 2. 6 鉄筋表面の pH

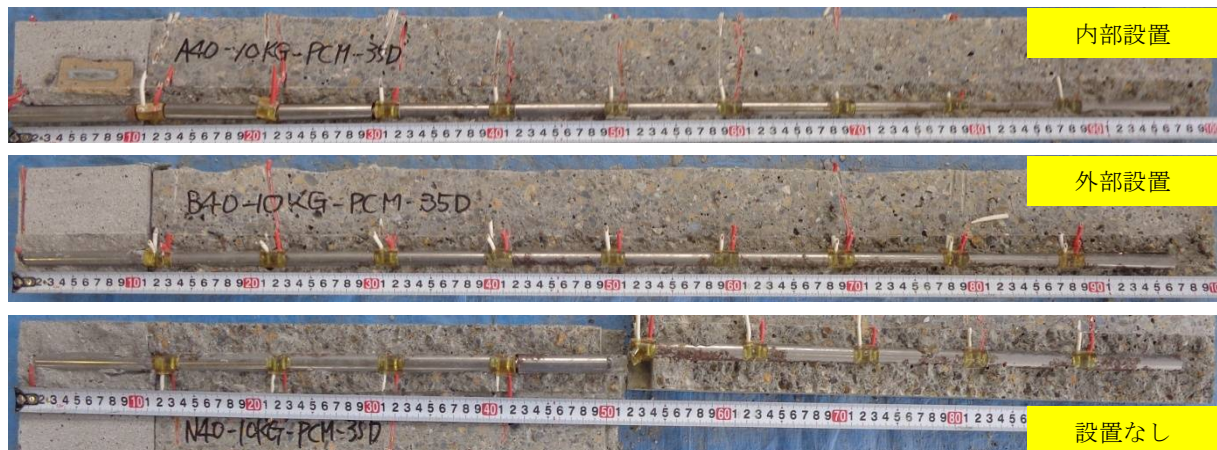


写真 4. 2. 7 躯体強度 40N/mm² シリーズの供試体解体直後の状況

躯体コンクリート強度が 40N/mm² の条件では，内部設置供試体と外部設置供試体ともに躯体内部の鉄筋は激しい腐食は見られない状況であった．特に犠牲陽極材から近い位置の鉄筋 No.2～No.4 では両方ともほとんど腐食は見られなかった．一方，鉄筋 No.5～10 では薄い錆が見られる状況であった．犠牲陽極材を設置していない設置なし供試体も激しい腐食は見られず，鉄筋 No.5 が薄い錆で覆われているようであるが，外観上は 3 つの供試体で大きな差は見られなかった。

(6) 鉄筋腐食量

次に各鉄筋を取り出して，鉄筋腐食量を測定した結果のうち，躯体コンクリート強度が 21N/mm² シリーズの結果を図 4. 2. 37 に，40N/mm² シリーズの結果を図 4. 2. 38 に示す。

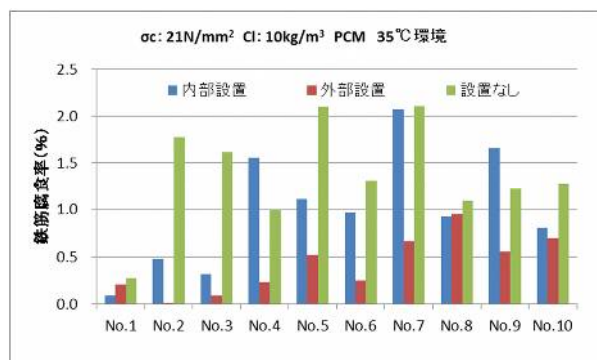


図 4. 2. 37 躯体コンクリート 21N/mm² シリーズの鉄筋腐食率

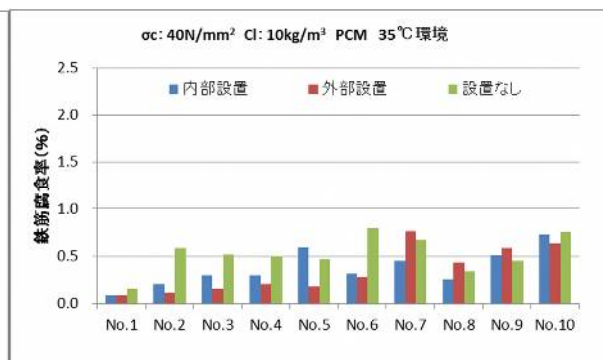


図 4. 2. 38 躯体コンクリート強度 40N/mm² シリーズの鉄筋腐食率

躯体強度 21N/mm^2 シリーズにおいて、設置なし供試体については、鉄筋が全面腐食しており、躯体コンクリート内部の鉄筋 No.2～10 は、高い鉄筋腐食率を示している。内部設置供試体については、解体直後の供試体の写真から、鉄筋は腐食していたが、界面近傍の鉄筋 No.2 および No.3 の腐食率は比較的低い値を示した。図 4.2.15 より、内部設置供試体においても試験開始から 6 か月までの犠牲陽極材から防食電流は供給されており、鉄筋腐食発生の抑止までは及ばなかったものの、鉄筋腐食速度は抑制されたものと考えられる。

一方、外部設置供試体は、犠牲陽極材近傍の鉄筋 No.2 の腐食率がほぼゼロと高い腐食抑制効果を示している。また、No.3～No.7 の範囲は他の供試体と比較して低い鉄筋腐食率に抑えられており、おおむね鉄筋 No.7 あたりまで防食効果があると考えられる。

躯体コンクリート 40N/mm^2 シリーズの鉄筋腐食率は 21N/mm^2 のものに比べて、設置なし供試体では全体的に半分程度の値となっており、コンクリート強度の増加により鉄筋腐食環境が緩和されたことが伺える。

内部設置供試体は設置なし供試体に比べて、鉄筋 No.2～No.4 において鉄筋腐食率が小さくなっており、犠牲陽極材による鉄筋の腐食抑制効果が確認された。

外部設置供試体では、犠牲陽極材近傍の鉄筋 No.2 において高い腐食抑制効果が確認された。また、設置なし供試体よりも鉄筋腐食率が低い範囲も鉄筋 No.2～No.6 までと、内部設置供試体に比べて広い範囲となっている。

(7) 犠牲陽極材からの防食電流量

犠牲陽極材から供給される防食電流量の経時変化を図 4.2.39 に示す。

躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 の内部設置供試体において、試験開始から 1 か月目は他のものに比べて 3 倍以上の非常に高い防食電流量を示しているが、その後急速に電流量が低下し、6 か月目では当初の $1/10$ 以下まで低下している。

躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体において、試験開始当初の犠牲陽極材からの防食電流量が大きくなった要因としては、他の供試体に比べて試験開始前の犠牲陽極材とその直近の鉄筋（ここでは鉄筋 No.1）との電位差が大きく、暴露環境も 35°C 、 $90\%\text{R.H.}$ と高温多湿であったため、犠牲陽極の亜鉛金属の反応活性が高い状態であったことが考えられる。

また、4.2.1 節で触れたように、犠牲陽極材は図 4.2.40 に示すようなバックフィル材が酸化亜鉛を溶解して、バックフィル材中の空隙を通過して溶解させることにより、亜鉛の反応活性を維持している。

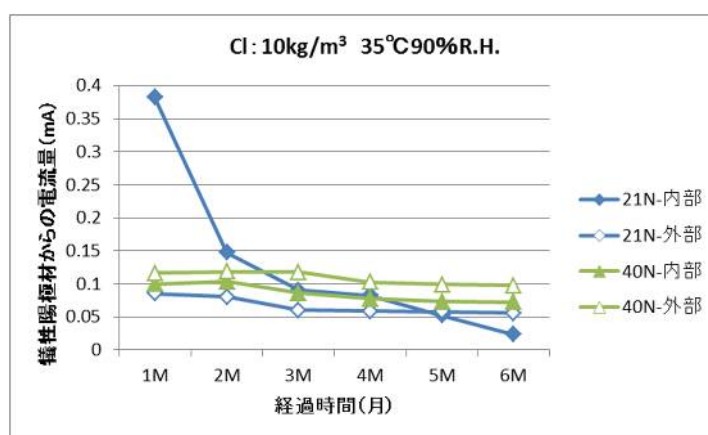


図 4.2.39 犠牲陽極材からの防食電流量

ここで、犠牲陽極材の電流量がバックフィル材の効果をを超えて過剰に供給されたとすると、バックフィル材中の空隙に酸化亜鉛が沈殿し、亜鉛の表面の pH が低下し、亜鉛の反応活性が低下することが考えられる。躯体コンクリート強度 21N/mm² の内部設置供試体の犠牲陽極材からの防食電流量が経時的に急激に低下した原因としては、バックフィル材の効果をを超えて過剰に高い防食電流量を供給したため、亜鉛の反応活性が低下した可能性が考えられる。

躯体コンクリート強度 21N/mm² の外部設置供試体や躯体コンクリート強度 40N/mm² の内部設置および外部設置供試体については、おおむね 0.1mA 程度の安定した電流量を供給しており、バックフィル材の効果が持続的に発揮されているものと考えられる。

したがって、本研究で用いた犠牲陽極材は、犠牲陽極材から供給される防食電流量が過剰（本研究では 0.4mA 程度以上）となると、その後の防食電流量が低下する可能性があるものと考えられる。今後、バックフィル材がどの程度の反応速度で酸化亜鉛を溶解するのかについて明らかにすることで、電流量の閾値がより明確になるものと考えられる。

供試体解体時の躯体コンクリート強度 21N/mm² の内部設置および外部設置供試体の犠牲陽極材内部の亜鉛金属について、未使用のものと比較した状況を写真 4.2.8 に示す。

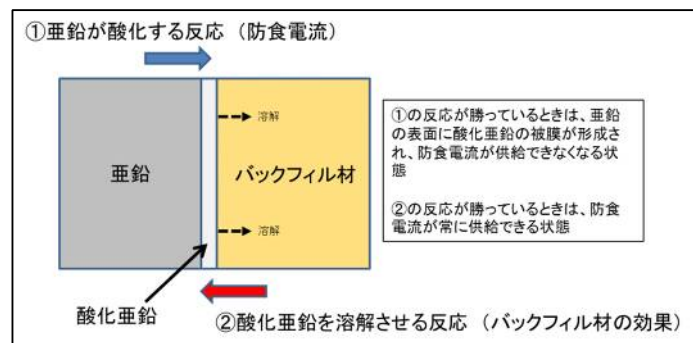


図 4.2.40 犠牲陽極材におけるバックフィル材の効果

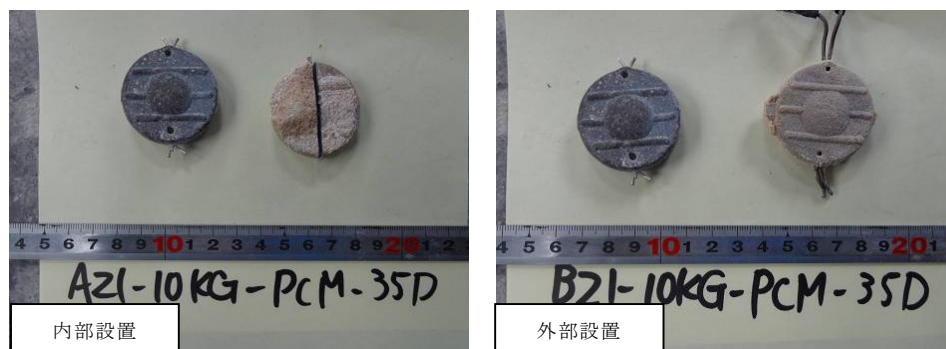


写真 4.2.8 躯体コンクリート強度 21N/mm² の内部設置および外部設置供試体の
供試体解体時の犠牲陽極材内部の亜鉛金属

躯体コンクリート強度 21N/mm² の内部設置供試体の亜鉛金属は、バックフィル材との分離が困難で亜鉛金属のみを取り出すことができず、質量の比較はできなかったが、未使用のものと比較して、著しく小さくなっているなどの現象はみられなかった。したがって、防食電流の減少は亜鉛金属の消耗によるものだけではないものと考えられる。次に写真 4.2.8 に示した各供試体内部の亜鉛金属の表面部分について、亜鉛金属を切断し、EPMA による SEM 観察および表面生成物の半定量解析を行った。EPMA 測定を実施した供試体の状況を写真 4.2.9 に示す。

試験開始から 6 か月時点において防食電流が減少した内部設置供試体および良好な電流量を保持している外部設置供試体共に亜鉛金属表面に白色の生成物が確認される。一方、新品には確認されなかった。これらの SEM 観察結果を図 4.2.41 に示す。

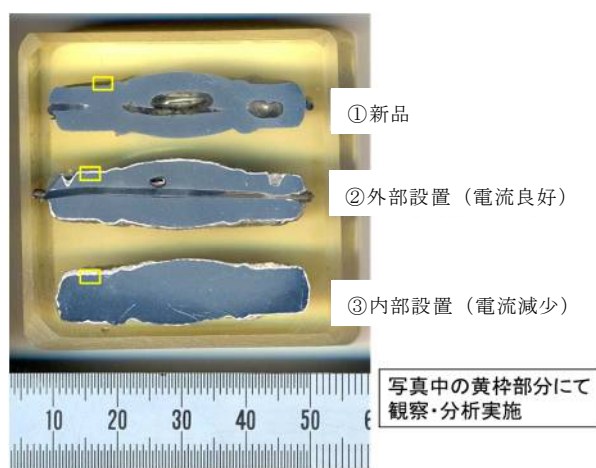
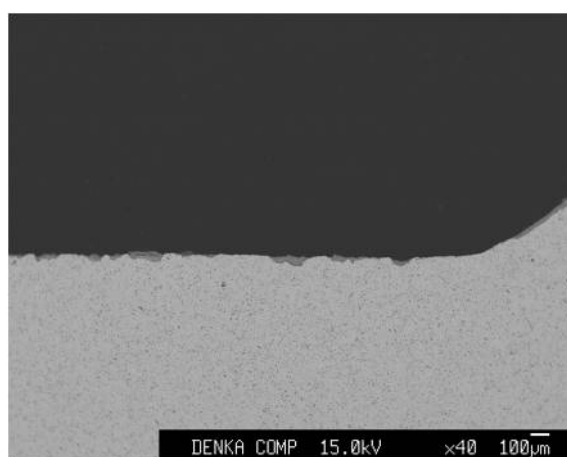
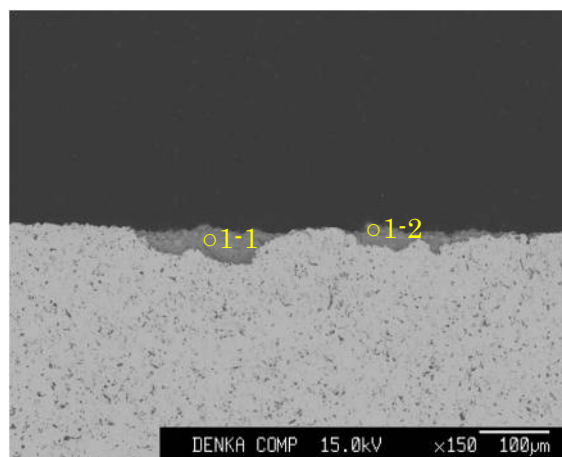


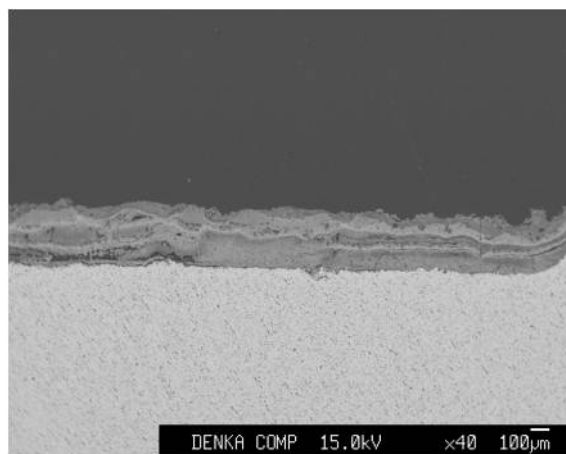
写真 4.2.9 EPMA 測定 of 供試体の状況



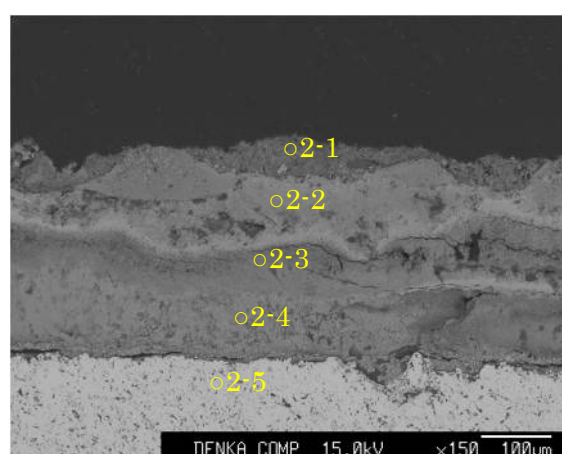
(a) 新品 (倍率 40 倍)



(b) 新品 (倍率 150 倍)

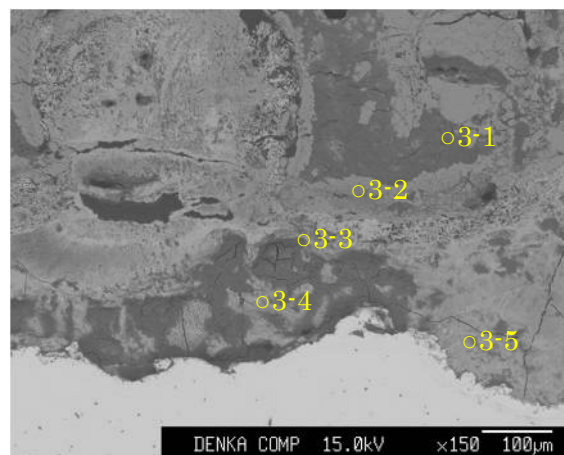
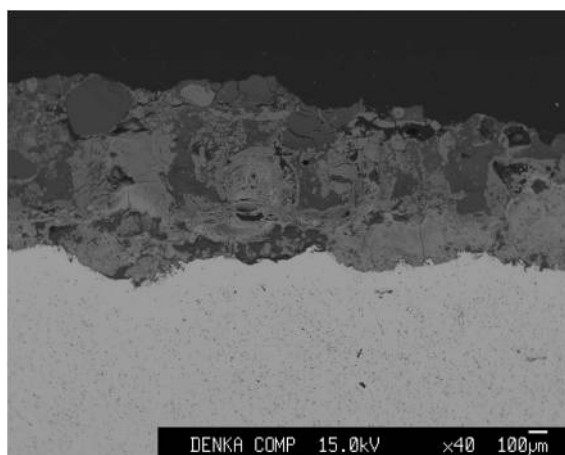


(c) 外部設置供試体 (倍率 40 倍)



(d) 外部設置供試体 (倍率 150 倍)

図 4.2.41-1 亜鉛金属の SEM 観察状況



(e) 内部設置供試体（倍率 40 倍）

(f) 内部設置供試体（倍率 150 倍）

図 4. 2. 41-2 垂鉛金属の SEM 観察状況

新品の犠牲陽極材では，金属表面に反応物はほとんど観察されなかった．わずかに変化した箇所があったのでその部分の元素分析を行った（(b) の No.1-1 および 1-2）．

防食電流量が良好な外部設置供試体の犠牲陽極材では，明らかに金属表面に層状の生成物が認められた．層状の生成物の厚みはおよそ 300 μm 程度であった．層状の生成物の各箇所（(d) の No.2-1～2-4）および金属部分（No.2-5）において，元素分析を行った．

防食電流が減少した内部設置供試体の犠牲陽極材においては，外部設置供試体と同じように金属表面に層状の生成物が認められたが，その厚みは明らかに外部設置供試体よりも厚く，およそ 800 μm 程度であった．各地点において元素の半定量分析を行い，Zn および O のモル比としてまとめたものを表 4. 2. 5 に示す．

表 4. 2. 5 各地点における Zn/O モル比

測定 No.	O mol%	Zn mol%	Zn/O mol 比
1-1	1.6	1.1	0.64
1-2	1.9	0.9	0.50
2-1	2.5	0.4	0.17
2-2	2.4	0.6	0.23
2-3	1.9	0.8	0.41
2-4	2.0	1.0	0.50
2-5	0.6	1.3	2.37
3-1	2.6	0.5	0.18
3-2	3.1	0.3	0.10
3-3	2.3	0.5	0.23
3-4	0.4	0.3	0.69
3-5	2.0	0.8	0.39

表 4.2.5 より，金属表面の生成物は，Zn/O モル比が 0.5 程度であるが，金属表面から遠ざかるにつれて，Zn の含有量が少なくなり，外側では Zn/O モル比が 0.1～0.2 程度となっている．これは，バックフィル材の効果により金属表面の生成物から亜鉛がイオン化して溶出しているため，Zn 含有率の低いモル比値を示しているものと考えられる．一方，Zn/O モル比が 1.0 となると酸化亜鉛 ZnO が生成していることになる．酸化亜鉛は中性の塩であるから，亜鉛金属表面の生成物のモル比が 1.0 に近くなるほど，防食電流を供給する反応効率が低下しているものと考えられる．

ここで，防食電流量が低下した内部設置供試体の金属表面生成物では，No.3-4 の測定点において，Zn/O モル比が 0.69 と 1.0 に近い値となっており，ZnO に近い組成の酸化亜鉛に覆われることによって反応効率が低下している可能性が考えられる．

(8) 鉄筋のマクロセル腐食環境改善効果

犠牲陽極材から防食電流を供給し続けたことによって，躯体コンクリートと断面修復材の界面付近のマクロセル腐食環境がどの程度改善されるかについて，打継界面をはさむ鉄筋の分極曲線から検討を行う．躯体コンクリート強度 21N/mm² および 40N/mm² の各供試体の鉄筋 No.1 のカソード分極曲線と鉄筋 No.2 のアノード分極曲線を図 4.2.28 の手法で整理したものを図 4.2.42 に示す．なお，カソード分極曲線については，躯体コンクリート強度が同じであれば大きな差はなかったので，平均化した 1 本の線で示した．なお，2 章で示したマクロセル腐食の概念図から，マクロセルによる腐食電流密度は実際にはアノードとカソードの分極曲線の交点ではなく，IR ドロップを考慮して，図中交点よりも電流密度が低い方にシフトした点線で示した電流密度となる．なお，1mA/m² 以下では，IR ドロップは 1mV 以下となるので，ほぼ交点付近の電流密度となる．

躯体コンクリート強度が 21N/mm² のシリーズでは，設置なし供試体と内部設置供試体に差がほとんど見られない．これは，犠牲陽極材を設置した内部設置供試体でも，分極曲線を測定した試験開始から 6 か月時点ではほぼ鉄筋は全面腐食となっており，鉄筋腐食の改善効果が見られなかったためと考えられる．また，内部設置供試体で犠牲陽極材を接続しても，鉄筋 No.2 の分極はみられない状態であったので，分極によるマクロセル腐食電流の改善は期待

できない．なお，設置なし供試体の鉄筋 No.2 に流れると考えられるマクロセル腐食電流は 11mA/m² 程度となる．この値は，図 4.2.17 に示した設置なし供試体の鉄筋 No.2 のマクロセル電流密度の測定値よりも高い値となる．これは，図 4.2.42 では最もマクロセル腐食電流が流れる

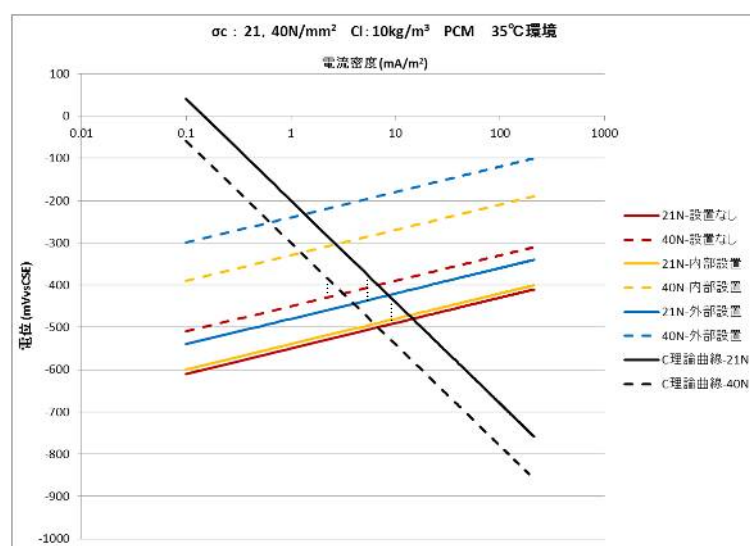


図 4.2.42 鉄筋 No.1 のカソードと鉄筋 No.2 のアノード分極曲線

と想定される、躯体コンクリートと断面修復材の界面付近の鉄筋 No.1 と鉄筋 No.2 の関係のみを考慮しているためである。実際には鉄筋 No.3 などの鉄筋にもマクロセル腐食電流（アノード電流）が分配されるため、鉄筋 No.2 に流れるマクロセル腐食電流密度は図 4.2.42 で想定される値よりも小さい値となると考えられる。

外部設置供試体では鉄筋 No.2 のアノード分極曲線は設置なし供試体に比べて貴側にシフトしており、犠牲陽極材から防食電流を供給しない状態でもマクロセル腐食電流が 8 mA/m^2 程度まで小さくなることが推察され、犠牲陽極材からの防食電流により、鉄筋のマクロセル腐食環境が改善されたと考えられる。また、外部設置供試体において、犠牲陽極材を接続している時は、鉄筋 No.2 は 100mV 以上卑に分極されているので、マクロセル腐食電流は 1mA/m^2 以下にさらに抑制されているものと考えられる。躯体コンクリート強度 40N/mm^2 のシリーズでは、犠牲陽極材を設置していない設置なし供試体において、 21N/mm^2 の設置なし供試体と比べて、マクロセル腐食電流は 4 mA/m^2 まで小さくなることが推察される。

犠牲陽極材を設置した内部設置供試体及び外部設置供試体では、設置なし供試体に比べて、鉄筋 No.2 のアノード分極曲線は貴側にシフトしており、犠牲陽極材からの防食電流により、鉄筋のマクロセル腐食環境が改善されたと考えられる。また、内部設置供試体のマクロセル腐食電流は、 1.5 mA/m^2 程度、外部設置供試体では、 0.8 mA/m^2 程度となり、外部設置供試体の方が内部設置供試体に比べて高い改善効果が認められた。これらは犠牲陽極材からの防食電流により、躯体コンクリート内の鉄筋 No.2 の表面から塩化物イオンが移動した可能性などが考えられる。

(9) 犠牲陽極材の防食効果による鉄筋の防食範囲

犠牲陽極材から供給する防食電流により、断面修復材と躯体コンクリート界面からどの程度の距離までの鉄筋に防食効果が認められるかについて、一般的な電気防食工法の指標である復極量と分極抵抗値から検討を行う。

本節で試験を行った内部設置および外部設置供試体の復極量の基準として、土木学会「電気化学的防食工法 設計・施工指針（案）」で採用されている最も一般的な基準である 100mV と、清水ら¹⁹⁾の研究に示されている 50mV の2つの基準で評価した。

試験開始から 6 か月時点における復極量を基準とした防食範囲を示したものを図 4.2.43 に示す。また、同じく 6 か月時点の分極抵抗値を基準とした防食範囲を図 4.2.44 に示す。基準は表 4.2.4 で示される CEB による基準に基づいている。

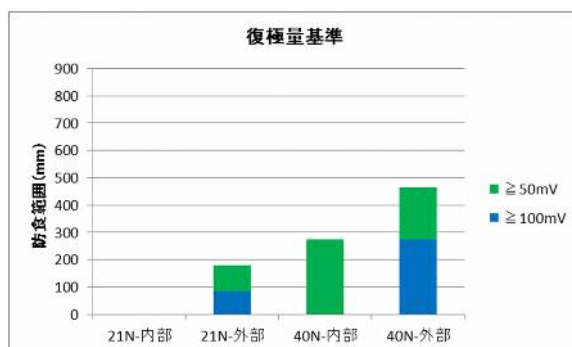


図 4.2.43 復極量基準による防食範囲

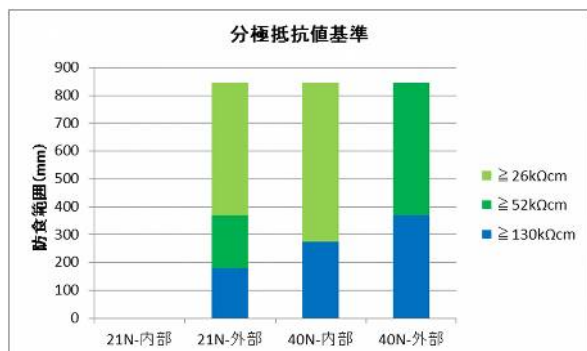


図 4.2.44 分極抵抗値基準による防食範囲

まず、復極量基準においても、分極抵抗値基準においても、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体においては、鉄筋の防食範囲が見られなかった。

復極量基準においては、躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 では外部設置供試体でも防食範囲は、 50mV 復極量基準で 200mm 程度の防食範囲であった。なお、躯体コンクリート強度が 40N/mm^2 では、外部設置供試体で防食範囲はほぼ倍の 500mm 程度まで広がる。

分極抵抗値基準においては、分極抵抗値 $26\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上の「中～高程度の腐食速度」では、躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体以外の供試体がすべての鉄筋で基準を満たす。より高い基準である $130\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上の「不動態状態（腐食なし）」で評価すると、おおむね復極量基準の 50mV と一致し、躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 では外部設置供試体で 200mm 程度、躯体コンクリート強度が 40N/mm^2 の外部設置供試体で 400mm 程度であった。

以上の結果から、内部設置供試体および外部設置供試体を比較すると、復極量基準においても分極抵抗値基準においても外部設置供試体の方がいずれも防食範囲は内部設置供試体よりも広い結果となった。

4.2.4 本節のまとめ

- (1) 躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 のシリーズは、塩化物イオン量が 10kg/m^3 かつ $35^\circ\text{C}90\%$ R.H. の条件では、半年ほどで鉄筋が全面腐食した。
- (2) 躯体コンクリート強度が 40N/mm^2 のシリーズは、塩化物イオン量が 10kg/m^3 かつ $35^\circ\text{C}90\%$ R.H. の条件では、半年では薄い錆が発生する程度であった。
- (3) 犠牲陽極材を断面修復材内部に設置する内部設置供試体は、躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 で塩化物イオン量が 10kg/m^3 かつ $35^\circ\text{C}90\%$ R.H. の条件では、半年ほどで鉄筋の腐食が発生し、厳しい腐食環境条件では防食効果の持続性に課題が残った。
- (4) 犠牲陽極材を打継ぎ界面付近の躯体コンクリートの外側に設置する外部設置供試体は、躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 で塩化物イオン量が 10kg/m^3 かつ $35^\circ\text{C}90\%$ R.H. の条件では、打継ぎ界面付近の腐食を抑制する防食効果を確認した。
- (5) 犠牲陽極材を断面修復材内部に設置する内部設置供試体は、躯体コンクリート強度が 40N/mm^2 で塩化物イオン量が 10kg/m^3 かつ $35^\circ\text{C}90\%$ R.H. の条件では、打継ぎ界面付近の腐食を抑制する防食効果を確認した。
- (6) 犠牲陽極材を打継ぎ界面付近の躯体コンクリートの外側に設置する外部設置供試体は、躯体コンクリート強度が 40N/mm^2 で塩化物イオン量が 10kg/m^3 かつ $35^\circ\text{C}90\%$ R.H. の条件では、打継ぎ界面付近の腐食を抑制する防食効果を確認した。
- (7) 塩化物イオン量が 10kg/m^3 かつ $35^\circ\text{C}90\%$ R.H. の条件では、内部設置供試体よりも外部設置供試体の方が防食範囲は広く、防食効果が高いと考えられる。
- (8) 防食電流量が減少した躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の内部設置供試体の犠牲陽極材の表面では、 Zn/O モル比が 1.0 に近い酸化亜鉛が生成しており、反応活性が低下している可能性が示唆された。

4.3 コンクリート中の塩化物イオン量が犠牲陽極材の防食性能に与える影響

本節では、断面修復工法を模擬した供試体を作製し、躯体コンクリート中の塩化物イオン量の違いが犠牲陽極材の防食性能に与える影響について検討した。

4.3.1 使用材料，試験配合および試験方法

使用材料および内部設置供試体，外部設置供試体および設置なし供試体の仕様は 4.2 節と同様である。表 4.3.1 に本節で検討する供試体の試験条件について示す。

表 4.3.1 作製供試体の試験条件

供試体名	暴露温度	供試体	躯体強度	躯体塩分	断面修復材
A21-2KG-PCM-20D	20℃ 40-60%RH	内部 設置	21N/mm ²	2kg/m ³	一般 PCM
A21-5KG-PCM-20D				5kg/m ³	
A21-10KG-PCM-20D				10kg/m ³	
B21-2KG-PCM-20D		外部 設置		2kg/m ³	
B21-5KG-PCM-20D				5kg/m ³	
B21-10KG-PCM-20D				10kg/m ³	
N21-2KG-PCM-20D		設置 なし		2kg/m ³	
N21-5KG-PCM-20D				5kg/m ³	
N21-10KG-PCM-20D				10kg/m ³	

コンクリート配合は表 4.3.2 に示すように、所定の塩化物イオン量になるように外割りで試薬の NaCl を混和した。表 4.3.3 に各々の配合のコンクリートについて 20℃水中養生の材齢 28 日での圧縮強度及び JISA1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠した全塩化物イオン量の測定結果を示す。概ね目標通りの性状を有するコンクリートが得られた。

表 4.3.2 コンクリート配合

目標塩化物イオン量	W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	Air (%)	配合 (kg/m ³)					
					W	C	S	G	Add	NaCl
2kg/m ²	59.0	13	48.0	4.5±1	164	278	881	972	2.78	4.3
5kg/m ²	59.0	13	48.0	4.5±1	164	278	881	972	2.78	8.3
10kg/m ²	59.0	13	48.0	4.5±1	164	278	881	972	2.78	16.5

表 4.3.3 圧縮強度及び全塩化物イオン量

目標塩化物イオン量	圧縮強度 (N/mm ²)	全塩化物イオン量 (kg/m ³)
2kg/m ²	26.5	1.9
5kg/m ²	27.0	4.8
10kg/m ²	26.9	9.6

供試体の暴露条件は、20℃室内の恒温室に静置した。なお、湿度については計測時期により 40%

R.H.から 60%R.H.の間で変動している．供試体の評価項目およびその試験方法については，4.2 節と同様である．

4.3.2 試験結果

(1) 犠牲陽極材および鉄筋の電位

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 のシリーズの Eon 電位および Eof 電位の計測結果を図 4.3.1～図 4.3.3 に示す．各電位の値は，3 体の供試体の平均値である．なお以下，電位の記述については特に断りがない限り，飽和硫酸銅（CSE）電極基準である．

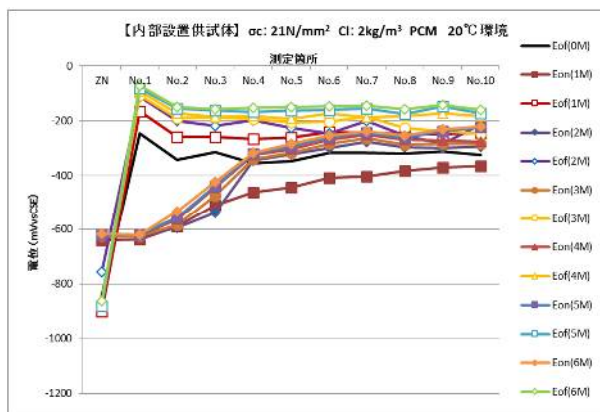


図 4.3.1 A21-2KG-PCM-20D の Eof, Eon 電位

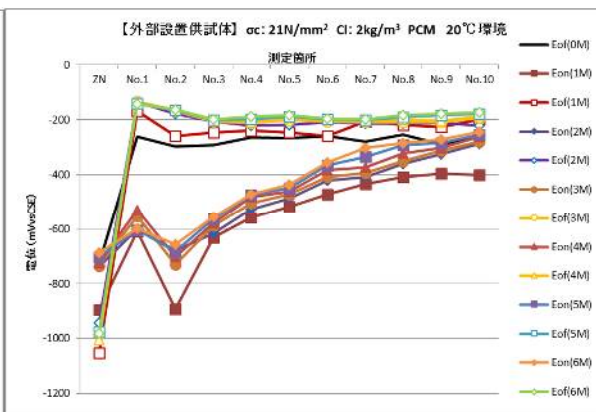


図 4.3.2 B21-2KG-PCM-20D の Eof, Eon 電位

躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の内部設置供試体では，犠牲陽極材の Eof 電位が試験開始当初の -1100mV から徐々に貴側に移行し，6 か月の時点では， -900mV と 200mV 程度貴になった．一方，犠牲陽極材の Eon 電位は -630mV 程度で試験期間を通じてほぼ一定値であった．

鉄筋の Eof 電位も試験開始から試験期間を通じて貴側に移行している．これは，供試体の乾燥の影響や材齢の進行による供試体の緻密化の影響などが考えられる．試験開始から 6 か月後の値は -200mV であり，ASTM C876

「Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete」の基準では，「90%以上の確率で腐食なし」と評価される値であり，ほとんど腐食は発生していないものと考えられる．

鉄筋の Eon 電位について，犠牲陽極材直近の鉄筋 No.1 については犠牲陽極材の Eon 電位とほぼ同じで -600mV 付近の一定値を取っている．躯体コンクリート側の鉄筋については，最も多く分極されている鉄筋 No.2 から徐々に分極量が小さくなるような形状となっている．開始から 2 か月後から鉄筋 No.2～10 の Eon 電位は少しずつ貴側に移行している．

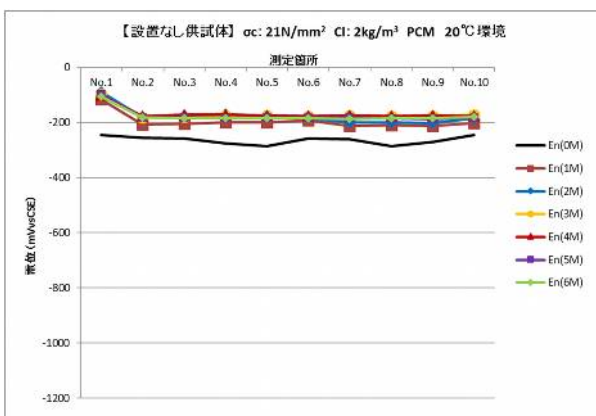


図 4.3.3 N21-2KG-PCM-20D の En 電位

躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の外部設置供試体では、犠牲陽極材の Eof 電位は、内部設置供試体と同様に試験開始当初の電位から徐々に貴側に 150mV 程度移行しているが、6 か月時点でも約 -950mV であり、高い活性を維持している。一方、犠牲陽極材の Eon 電位は1 か月から 2 か月の間で 200mV 程度貴側に移行し、その後はほぼ一定値となっている。これは、供試体を設置した室内の環境が 2 か月後の測定時だけ湿度制御の機材が故障したため、想定よりも乾燥した状態におかれたためと考える。また、犠牲陽極材は外部設置のため、外部の環境の影響を受けやすく、乾燥状態の影響を大きく受けてしまった可能性が考えられる。

鉄筋の Eof 電位は、試験開始前の電位よりも若干貴側に移行し、6 か月経過時点では -200mV 程度の値となっており、内部設置供試体と同様に鉄筋腐食は生じていないものと考えられる。

鉄筋の Eon 電位について、犠牲陽極材を鉄筋 No.2 の直近に取り付けているため、鉄筋 No.2 が他の分割鉄筋に比べて大きく卑側に分極され、6 か月経過時点でもその効果は持続している。試験期間を通じて鉄筋 No.2~10 の Eon 電位は開始から 2 か月後から少しずつ貴側に移行している。

躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の設置なし供試体では、Eof 電位は、試験開始前の電位から試験期間を通じて、徐々に貴側に移行してきている。電位の値は -200mV 程度であり、ASTM C876 の基準に照らしても、90%以上の腐食無しで推移しており、犠牲陽極材を取り付けていない状態でも鉄筋腐食は進行していないものと考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 のシリーズの Eon 電位および Eof 電位の計測結果を図 4.3.4~図 4.3.6 に示す。

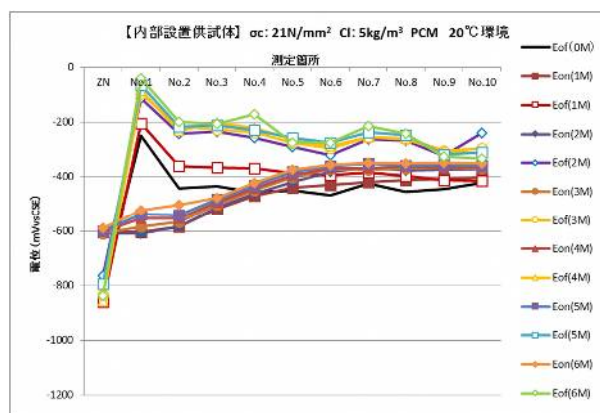


図 4.3.4 A21-5KG-PCM-20D の Eof, Eon 電位

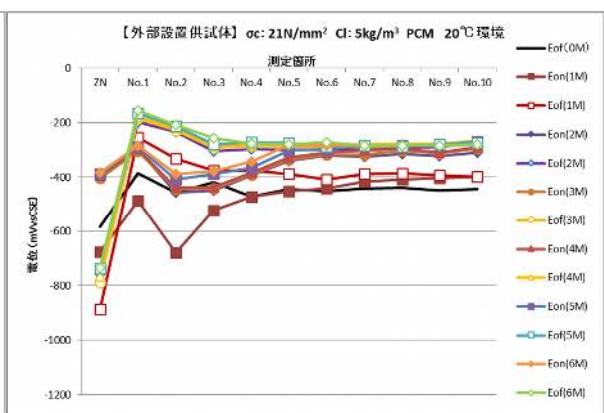


図 4.3.5 B21-5KG-PCM-20D の Eof, Eon 電位

躯体コンクリートの塩化物イオン量 5kg/m^3 の内部設置供試体では、犠牲陽極材の Eof 電位は他と同様、貴にシフトしている。また、犠牲陽極材の Eon 電位は -600mV 程度で試験期間を通じてほぼ一定値であり、躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の内部設置供試体の挙動と一致している。

鉄筋の Eof 電位も試験開始から試験期間

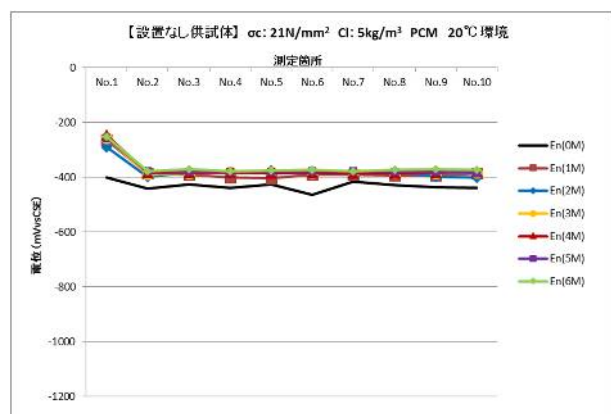


図 4.3.6 N21-5KG-PCM-20D の En 電位

を通じて貴側に移行している。躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の内部設置供試体とは異なり、躯体コンクリート内部の鉄筋 No.2 から No.10 にかけて徐々に卑側の値を取るような形となっている。試験開始から 6 か月後の値は鉄筋 No.2 で約 -200mV であるが、No.10 では約 -350mV と 150mV 程度の差が出ている。ASTM C876 の基準では、鉄筋 No.2 は「90%以上の確率で腐食なし」と評価されるが、鉄筋 No.10 では「90%以上の確率で腐食あり」評価される値であり、躯体コンクリート内部の鉄筋間で腐食環境に差が出てきている可能性がある。

鉄筋の Eon 電位については、犠牲陽極材に近い鉄筋 No.1 が最も卑な電位をとり、鉄筋 No.10 に向かって少しずつ貴になるような形となっている。全体としては、試験期間を通じて、少しずつ貴側に移行している。

躯体コンクリートの塩化物イオン量 5kg/m^3 の外部設置供試体では、犠牲陽極材の Eof 電位は、躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の外部設置供試体と同様に試験開始当初の電位から徐々に貴側に 150mV 程度移行している。一方、犠牲陽極材の Eon 電位は 1 か月から 2 か月の間で $200\sim 300\text{mV}$ 程度貴側に移行し、その後も少しずつ貴側にシフトしていつている。これは、躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の外部設置供試体と同様に設置環境が乾燥し、コンクリートの抵抗が高くなった影響を受けているものと考えられる。鉄筋の Eof 電位は、試験開始前の電位よりも貴側に移行し、躯体コンクリートの塩化物イオン量 5kg/m^3 の内部設置供試体と同様に犠牲陽極材に近い鉄筋 No.1 が最も貴な電位をとり、鉄筋 No.10 に向かって少しずつ卑になるような形となっていて、コンクリート内部の鉄筋で腐食環境に差が出てきている可能性がある。

鉄筋の Eon 電位について、犠牲陽極材を鉄筋 No.2 の直近に取り付けているため、鉄筋 No.2 が他の分割鉄筋に比べて大きく卑側に分極されている。時間の経過とともに分極量が減少しているが、鉄筋 No.2 の Eon 電位が最も卑になる形は変化しておらず、界面近傍の躯体コンクリート内の鉄筋を効果的に防食しているものと考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオン量 5kg/m^3 の設置なし供試体では、Eof 電位は、試験開始前の電位から試験期間を通じて、徐々に貴側に移行してきているが、電位の値は -400mV 程度であり、ASTM C876 の基準では 90%以上の確率で腐食ありとなるので、鉄筋腐食は進行しているものと考えられる。

次に躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 のシリーズの Eon 電位および Eof 電位の計測結果を図 4.3.7～図 4.3.9 に示す。

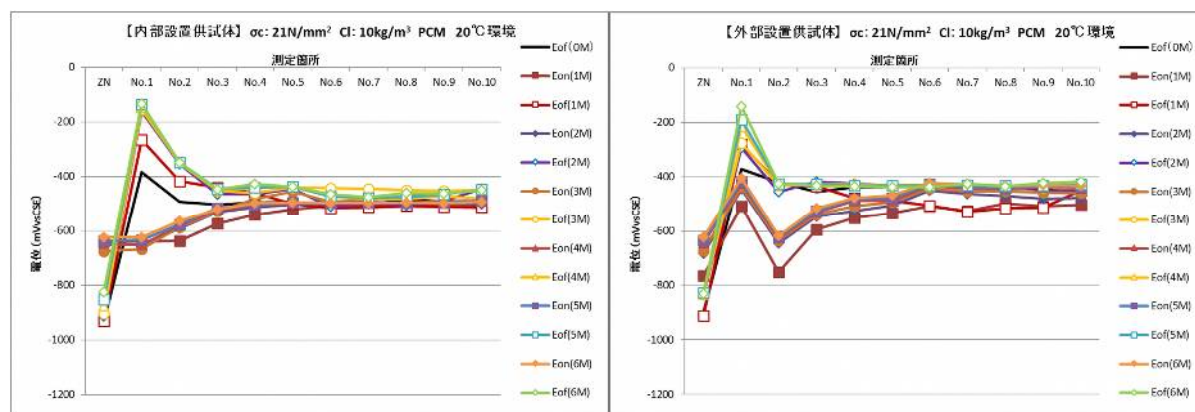


図 4.3.7 A21-10KG-PCM-20D の Eof, Eon 電位 図 4.3.8 B21-10KG-PCM-20D の Eof, Eon 電位

躯体コンクリートの塩化物イオン量 10kg/m^3 の内部設置供試体では、犠牲陽極材の Eof 電位は他と同様、6 か月の期間中に 100mV ほど貴にシフトしている。また、犠牲陽極材の Eon 電位は -600mV 程度で試験期間を通じてほぼ一定値であり、他の内部設置供試体の挙動と一致している。鉄筋の Eof 電位も試験開始から試験期間を通じて貴側に移行している。

A21-5KG-PCM-20D と同様に躯体コンクリート内部の鉄筋 No.2 から No.10 にかけて徐々に卑側の値を取るような形となっているが、その電位は鉄筋 No.2 で約 -350mV で、No.10 では約 -450mV と 100mV 程度の差が出ている。これらの電位は ASTM C876 の基準では、全て「90%以上の確率で腐食あり」評価される値であり、A21-5KG-PCM-20D ほどは躯体コンクリート内部の鉄筋間で腐食環境に差が出ないのではないかと考えられる。

鉄筋の Eon 電位については、犠牲陽極材に近い鉄筋 No.1 が最も卑な電位をとり、鉄筋 No.10 に向かって少しずつ貴になるような形となっている。全体としては、試験期間を通じて、少しずつ貴側に移行している。

躯体コンクリートの塩化物イオン量 10kg/m^3 の外部設置供試体では、犠牲陽極材の Eof 電位は、他の外部設置供試体と同様に試験開始当初の電位から徐々に貴側にシフトし、6 か月では 150mV 程度移行している。一方、犠牲陽極材の Eon 電位は1 か月から2 か月の間で 200mV ほど貴側に移行するが、2 か月以降はあまり大きな変化はない。鉄筋の Eof 電位は、鉄筋 No.1 のみ試験開始前の電位よりも貴側に移行している。それに対して、鉄筋 No.2~No.10 の Eof 電位は期間を通じて -400mV 程度のほぼ同じ値を取っている。鉄筋の Eon 電位について、犠牲陽極材を鉄筋 No.2 の直近に取り付けているため、鉄筋 No.2 が他の分割鉄筋に比べて大きく卑側に分極されている。6 か月経過時点では少し貴側に電位がシフトしているが、鉄筋 No.2 が最も卑な電位を取っており、犠牲陽極材を鉄筋 No.2 の直上に設置した効果が表れているものと考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオン量 10kg/m^3 の設置なし供試体では、Eof 電位は、試験期間を通じてほぼ -500mV 程度の値であり、ASTM C876 の基準では 90%以上の確率で腐食ありとなるので、鉄筋腐食は進行しているものと考えられる。

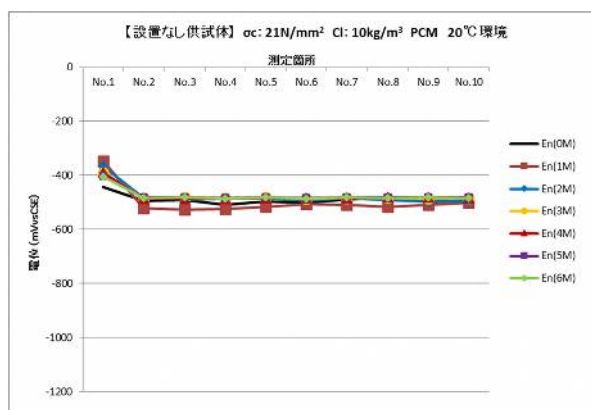


図 4.3.9 N21-10KG-PCM-20D の Eof 電位

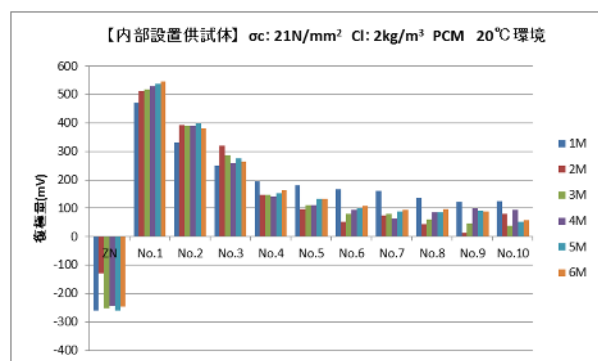


図 4.3.10 A21-2KG-PCM-20D の復極量

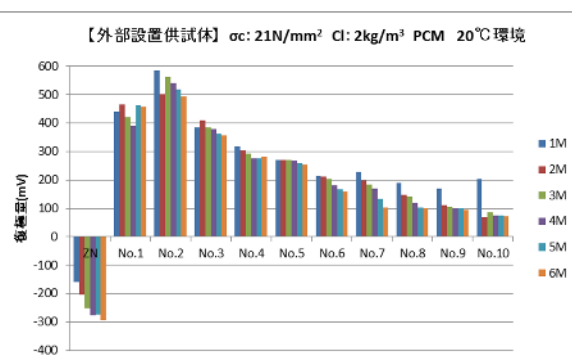


図 4.3.11 B21-2KG-PCM-20D の復極量

次に、躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の内部設置供試体および外部設置供試体の復極量を図 4.3.10～図 4.3.11 に示す。なお、Eof が Eio よりも卑側の場合、復極量はマイナスとして示した。

躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の内部設置供試体において、犠牲陽極材の復極量（電位差）は試験期間を通じておおむね 250mV 程度の値を維持しており、犠牲陽極材としての性能は当初の性能を維持しているものと考えられる。一方、躯体コンクリート中の鉄筋 No.2～No.10 の復極量も試験開始直後からの値を維持しており、試験期間を通じてほぼ一定の防食性能を発揮していると考えられる。また、躯体コンクリート内部の鉄筋の復極量は、鉄筋 No.2 で 400mV であり、No.10 でも 100mV 近い値を示していることから、躯体コンクリート内部の鉄筋腐食はほとんど見られないものと考えられる。本供試体の試験条件で土木学会「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」に定められる腐食発生限界塩化物イオン濃度¹⁶⁾を算出すると 1.63kg/m^3 であり、腐食環境にあるがかなり緩慢なものと考えられる。したがって、そもそも各分割鉄筋のミクロセル腐食の進行はかなり遅いことが想定され、ここに犠牲陽極材による防食効果が加わる状態となるので、鉄筋の腐食はほとんどないものと考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の外部設置供試体において、犠牲陽極材の復極量（電位差）は、当初は 200mV を切る程度であったが試験期間 6 か月の時点では内部設置供試体とほぼ同程度の 300mV となった。

鉄筋の復極量は、躯体コンクリート中の鉄筋 No.2 が 6 か月経過後も最も大きい値を示しており、マクロセル腐食が最も懸念される鉄筋位置において効果的に防食効果を発揮しているものと考えられる。躯体コンクリート中のその他の鉄筋についても高い復極量を示しており、鉄筋 No.10 についても 100mV 近い復極量を示している。

次に躯体コンクリートの塩化物イオン量 5kg/m^3 の内部設置供試体および外部設置供試体の復極量を図 4.3.12～13 に示す。

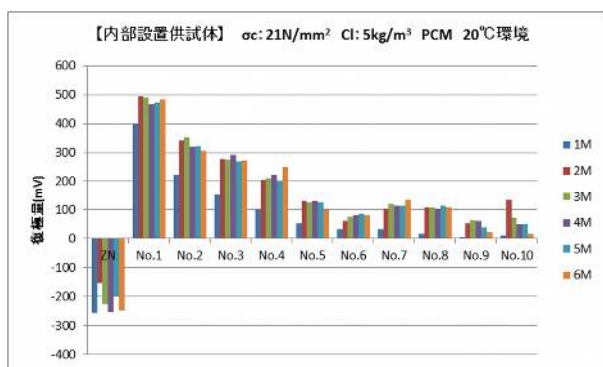


図 4.3.12 A21-5KG-PCM-20D の復極量

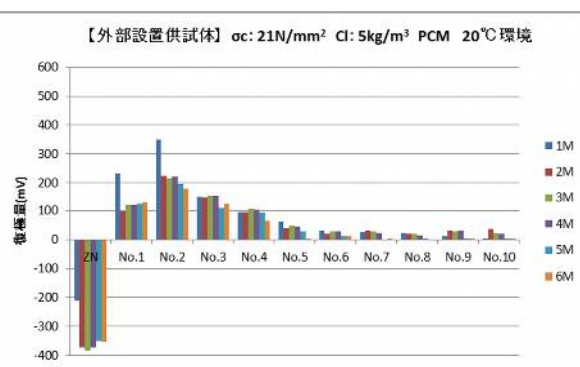


図 4.3.13 B21-5KG-PCM-20D の復極量

躯体コンクリートの塩化物イオン量 5kg/m^3 の内部設置供試体において、犠牲陽極材の復極量（電位差）は試験期間を通じておおむね 200mV 程度の値を維持し、躯体コンクリート中の鉄筋 No.2～No.10 の復極量も試験開始直後からの値を維持しており、試験期間を通じてほぼ一定の防食性能を発揮していると考えられる。しかし、鉄筋 No.9 および No.10 については、復極量が

100mV を切るようになっていく。一方、鉄筋 No.2 での復極量は 300mV であり、鉄筋 No.5 までは復極量 100mV を維持しており、この範囲の鉄筋について、腐食はほとんど見られないものと考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオン量 5kg/m^3 の外部設置供試体において、鉄筋の復極量は、躯体コンクリート中の鉄筋 No.2 が 6 か月経過後も最も大きい値を示す形は同じであり、この付近の鉄筋については高い防食性能を示すものと考えられる。一方、鉄筋 No.5～10 の復極量は内部設置供試体よりも小さくなっている。Eon 電位が 2 か月後以降かなり貴側にシフトした形となったためであり、設置環境が乾燥した影響が考えられる。

次に躯体コンクリートの塩化物イオン量 10kg/m^3 の内部設置供試体と外部設置供試体の復極量を図 4.3.14～15 に示す。

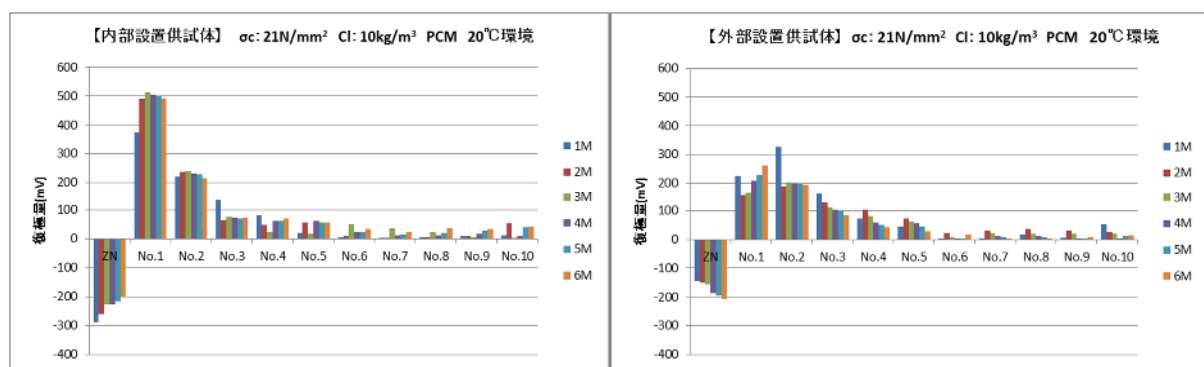


図 4.3.14 A21-10KG-PCM-20D の復極量

図 4.3.15 B21-10KG-PCM-20D の復極量

躯体コンクリートの塩化物イオン量 10kg/m^3 の内部設置供試体において、躯体コンクリート中の鉄筋 No.2～No.10 の復極量は、鉄筋 No.2 においては 200mV の値を維持しているが、鉄筋 No.3 以降は 100mV を切っており、鉄筋 No.6～10 については、復極量はほとんど認められない。

躯体コンクリートの塩化物イオン量 10kg/m^3 の外部設置供試体において、躯体コンクリート中の鉄筋 No.2～No.10 の復極量は、外部設置の特徴である鉄筋 No.2 が最も大きな値を示し、200mV の値を維持している。しかし、鉄筋 No.3 以降は 100mV を切っており、鉄筋 No.6～10 については、復極量はほとんど認められず、内部設置供試体と明確な差異は見られなかった。

(2) 分割鉄筋に流れるマクロセル電流

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 のシリーズの分割鉄筋に流れるマクロセル電流を電流密度で表した図を図 4.3.16～図 4.3.18 に示す。

図中、内部設置供試体及び外部設置供試体の正の値は犠牲陽極材からの防食電流を受け取り、防食側にあることを示す。設置なし供試体については正の値はアノード側、負の値はカソード側にあることを示す。なお、設置なし供試体は計測された電流密度が小さかったため、縦軸の大きさが異なる。

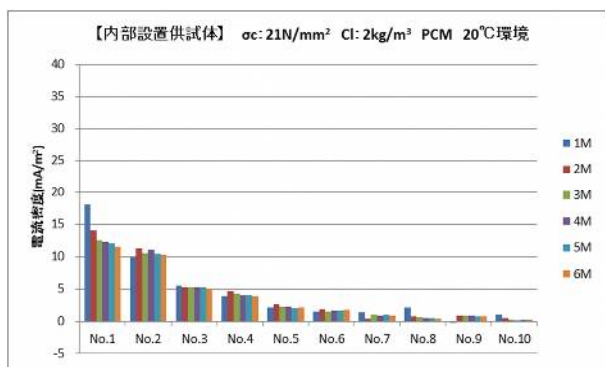


図 4.3.16 A21-2KG-PCM-20D のマクロセル電流密度

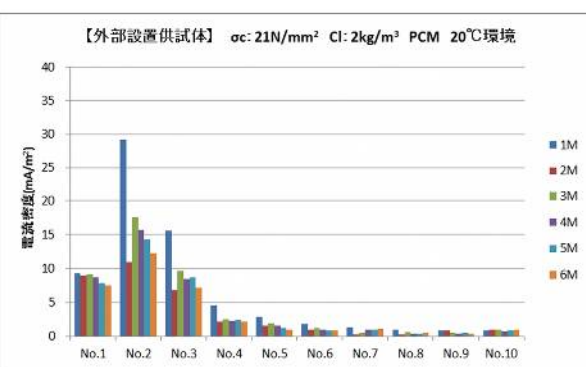


図 4.3.17 B21-2KG-PCM-20D のマクロセル電流密度

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 の内部設置供試体のマクロセル電流密度は、試験期間を通じて、全ての鉄筋においてほぼ一定の値となっている。また、鉄筋 No.10 においても防食側の電流が供給されており、犠牲陽極材の防食効果が持続的に発揮されているものと考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 の外部設置供試体のマクロセル電流密度は、鉄筋 No.2 および No.3 の 1 ヶ月後の電流値を除けば、試験期間を通じて、全ての鉄筋においてほぼ一定の値の電流が供給されている。また、犠牲陽極材の近傍である鉄筋 No.2 の電流値が最も大きい形となっており、効果的に躯体コンクリート側の鉄筋に防食電流を供給できているものと考えられる。また、鉄筋 No.10 においても防食側の電流が供給されており、犠牲陽極材の防食効果が持続的に発揮されているものと考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 の設置なし供試体のマクロセル電流密度は、ごくわずかである。鉄筋 No.10 が若干アノード側の電流が流れているが、電流密度の値としては 0.06mA/m^2 程度であり、ほぼ無視できるものと考えられる。

次に躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 のシリーズの分割鉄筋に流れるマクロセル電流を電流密度で表した図を図 4.3.19～図 4.3.21 に示す。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 の内部設置供試体マクロセル電流密度は、試験期間を通じて、全ての鉄筋においてほぼ一定の値となっているが、鉄筋 No.2 については試験期間の経過とともに若干低下する傾向を示している。躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 の内部設置供試体とは異なり、鉄筋 No.9 において、腐食側の防食電流が確認され、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 の内部設置供試体と比べて防食効果の及ぶ範囲が小さくなっていることを示唆するものと考えられる。

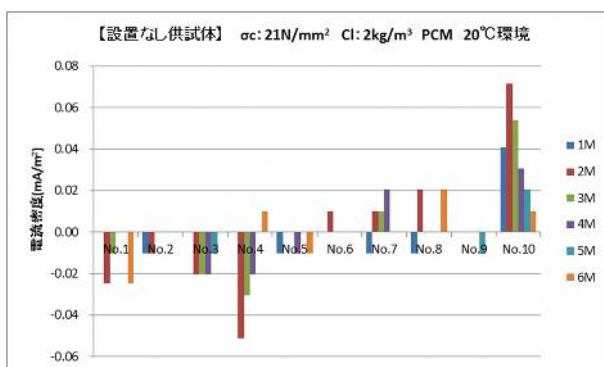


図 4.3.18 N21-2KG-PCM-20D のマクロセル電流密度

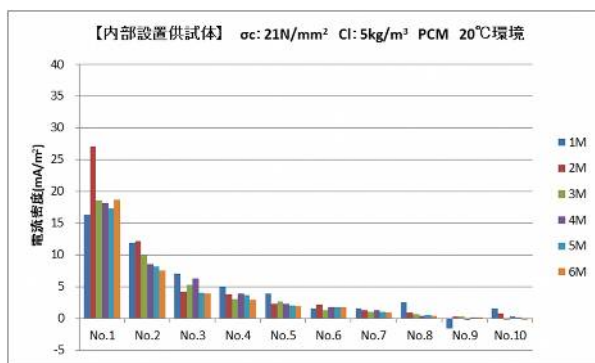


図 4.3.19 A21-5KG-PCM-20D のマクロセル電流密度

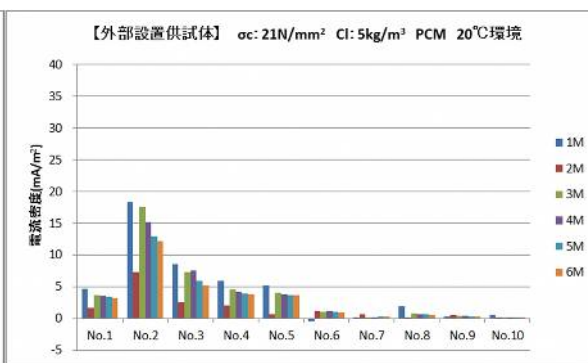


図 4.3.20 B21-5KG-PCM-20D のマクロセル電流密度

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 の外部設置供試体のマクロセル電流密度は、犠牲陽極材近傍の鉄筋 No.2 および No.3 で高い防食電流密度が認められ、鉄筋 No.2~4 あたりまでは鉄筋防食効果を示すものと考えられる。一方、鉄筋 No.6~10 の防食電流密度はほとんどゼロに近い値で、一部は腐食側の電流密度にもなっている。復極量の傾向と同じく、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 の外部設置供試体との明確な差異は認められない。

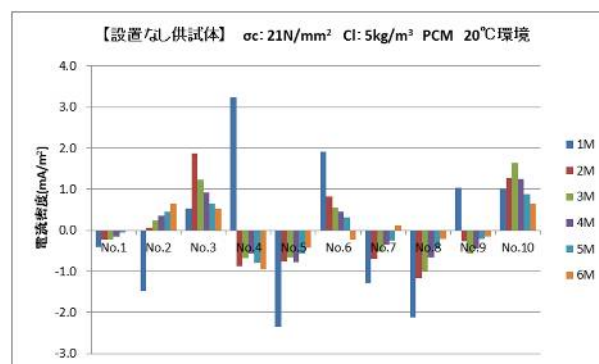


図 4.3.21 N21-5KG-PCM-20D のマクロセル電流密度

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 の設置なし供試体のマクロセル電流密度は、鉄筋 No.2 が 1 か月後の値がマクロカソードになっているが、これは比較的近傍の鉄筋 No.4 が突出してマクロアノードになったためと考えられる。また、マクロセル電流密度の値は躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 の設置なし供試体に比べて 100 倍近くとなっており、鉄筋のマクロセル腐食反応が活発化してきていることが伺える。

次に躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 のシリーズの分割鉄筋に流れるマクロセル電流を電流密度で表した図を図 4.3.22~図 4.3.24 に示す。

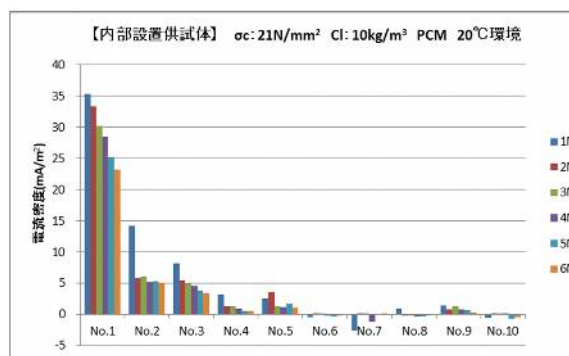


図 4.3.22 A21-10KG-PCM-20D のマクロセル電流密度

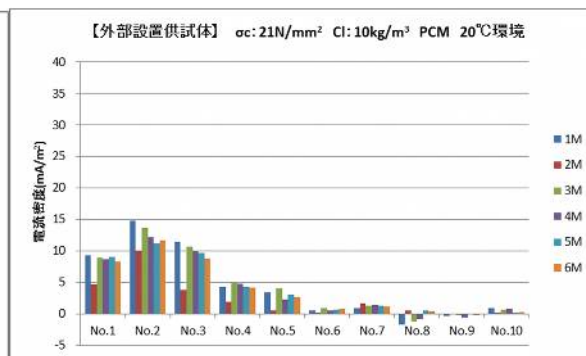


図 4.3.23 B21-10KG-PCM-20D のマクロセル電流密度

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 の内部設置供試体のマクロセル電流密度は、断面修復材内部の鉄筋 No.1 に卓越して大きな防食電流密度が認められ、躯体コンクリート内部の鉄筋には鉄筋 No.5 までは防食側の電流密度となっている。No.6 以降は腐食側の電流密度も認められる状態である。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 の外部設置供試体のマクロセル電流密度は、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 の内部設置供試体とは異なり、断面修復材内部の鉄筋 No.1 に卓越して大きな電流密度は認められず、犠牲陽極材近傍の鉄筋 No.2 および No.3 で高い防食電流密度が認められた。鉄筋 No.4 以降も鉄筋 No.7 まで防食側の電流値であり、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 の内部設置供試体よりも広範囲で防食側の電流密度が認められた。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 の設置なし供試体のマクロセル電流密度は、鉄筋 No.1 がマクロカソード、鉄筋 No.2 および No.3 がマクロアノードになっている。躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 の設置なし供試体よりも比較的高い電流密度となっており、マクロセル腐食が懸念される状態となっている。

(3) 分割鉄筋の分極抵抗

図 4.3.25～図 4.3.27 に躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 のシリーズの分割鉄筋の分極抵抗を測定した結果を示す。

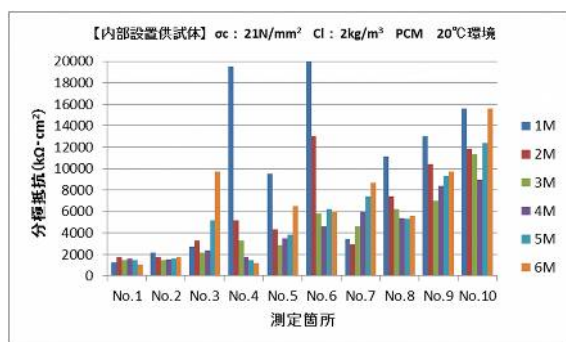


図 4.3.25 A21-2KG-PCM-20D の分極抵抗

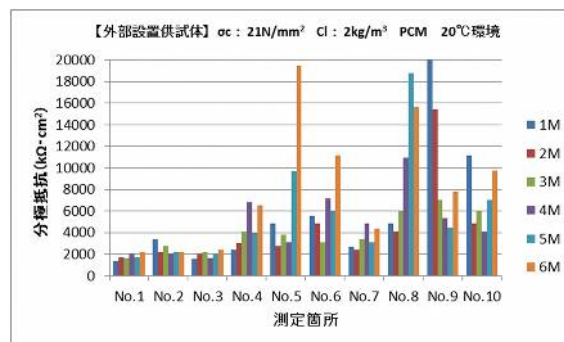


図 4.3.26 B21-2KG-PCM-20D の分極抵抗

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 の内部設置供試体、外部設置供試体および設置なし供試体ともに、試験期間中を通じて、全ての鉄筋で分極抵抗が $200\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以上を示しており、表 4.2.4 に示した CEB による腐食速度の判定基準では、「不動態状態(腐食なし)」

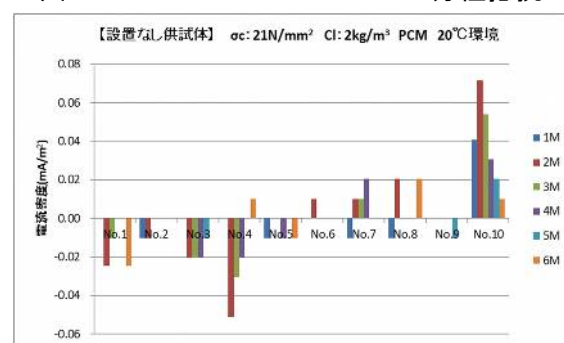


図 4.3.27 N21-2KG-PCM-20D の分極抵抗

と判定されることから、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 のシリーズは、6 か月の試験期間を通じて鉄筋腐食はほぼ無いものと考えられる。

次に躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 のシリーズの分割鉄筋の分極抵抗を測定した結果を図 4.3.28～図 4.3.30 に示す。

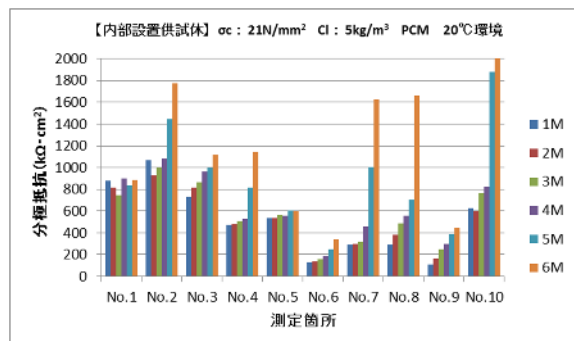


図 4.3.28 A21-5KG-PCM-20D の分極抵抗

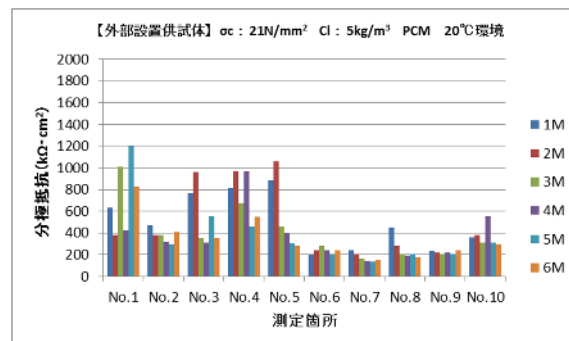


図 4.3.29 B21-5KG-PCM-20D の分極抵抗

躯体コンクリートの塩化物イオン量 5kg/m^3 の内部設置供試体および外部設置供試体は、試験期間中を通じて、ほとんどの鉄筋で分極抵抗が $200\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上を示しており、ほぼ腐食は無い状態と考えられる。鉄筋 No.1～No.5 に比べて、犠牲陽極材から遠い躯体コンクリート内の鉄筋 No.6～No.10 で比較的小さな値となる傾向にあるが、前述のように分極抵抗値は $200\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上を示しており、腐食は軽微なものと考えられる。

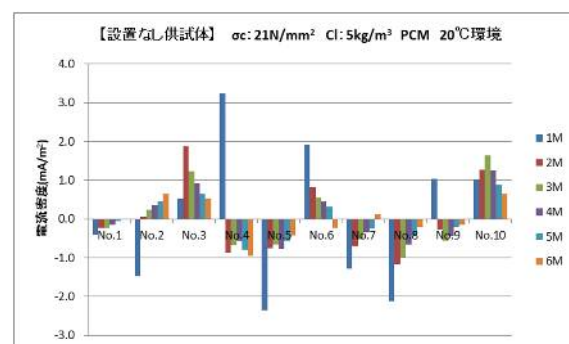


図 4.3.30 N21-5KG-PCM-20D の分極抵抗

一方、設置なし供試体の各鉄筋の分極抵抗は、マクロアノードであった鉄筋 No.2 および No.3 の値が全体の中では低い値となっているが、分極抵抗値は $200\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上を示しており、腐食は軽微なものと考えられる。

次に図 4.3.31～図 4.3.33 に躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 のシリーズの分極抵抗を示す。

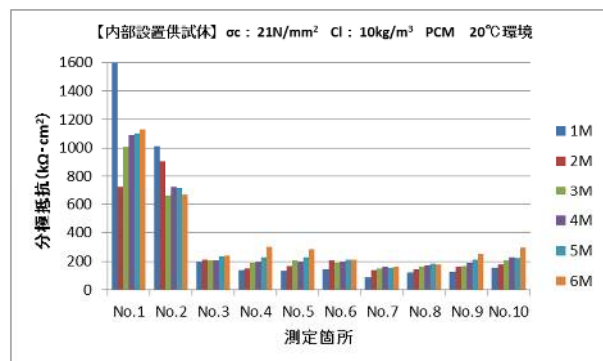


図 4.3.31 A21-10KG-PCM-20D の分極抵抗

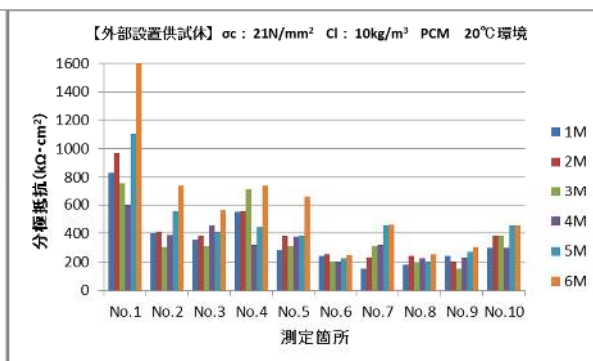


図 4.3.32 B21-10KG-PCM-20D の分極抵抗

躯体コンクリートの塩化物イオン量 10kg/m^3 の内部設置供試体の分極抵抗は、躯体コンクリート内部の鉄筋の中では、犠牲陽極材に最も近い鉄筋 No.2 が突出して高く、その他はほぼ同じ $200\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 程度を示す。試験期間中で多少上下しているが、おおむね同じ値を維持している。

外部設置供試体の分極抵抗については、躯体コンクリート内部の鉄筋のうち、犠牲陽極材に近い鉄筋 No.2～No.5 の分極抵抗が 400

～ $600\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 比較的高く、No.6 以降はほぼ同じ $200\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 程度を示す。内部設置供試体も外部設置供試体も犠牲陽極材に近い鉄筋の分極抵抗が高くなる傾向を示しているようである。

設置なし供試体の分極抵抗については、躯体コンクリート内部の鉄筋の分極抵抗は 6 か月後でおおむね $30\sim 40\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ でほぼ同じ値を示している。また、試験期間中を通じて分極抵抗が増大する傾向も示している。腐食がほとんど認められない分極抵抗値を示す内部設置供試体および外部設置供試体と異なって、分極抵抗の値は、中～高程度の腐食の可能性を示した値となり、犠牲陽極材の有無により腐食環境に差ができてきているものと考えられる。

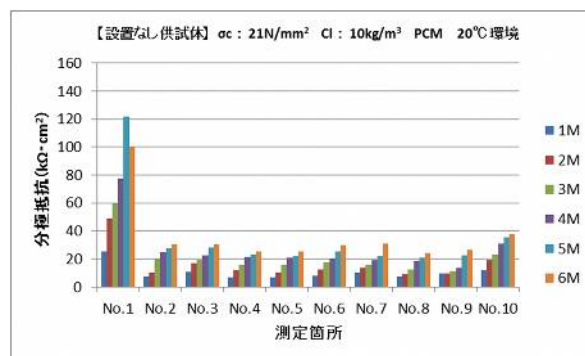


図 4.3.33 N21-10KG-PCM-20D の分極抵抗

(4) 分割鉄筋の分極曲線

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 のシリーズの分割鉄筋の分極曲線を測定した結果を図 4.3.34～図 4.3.36 に示す。なお、各分極曲線は既往の文献¹⁸⁾を参考に、分極抵抗を測定した際に計測される抵抗値を用いて IR 補正を行ったものであり、凡例の最後の添え字は C: カソード, A: アノードであることを示す。

躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の内部設置供試体の各分割鉄筋の分極曲線について、鉄筋 No.1 から No.10 まではほぼ $0.1\sim 0.5\text{mA/m}^2$ 程度の電流密度で分極が得られるような傾向を示している。

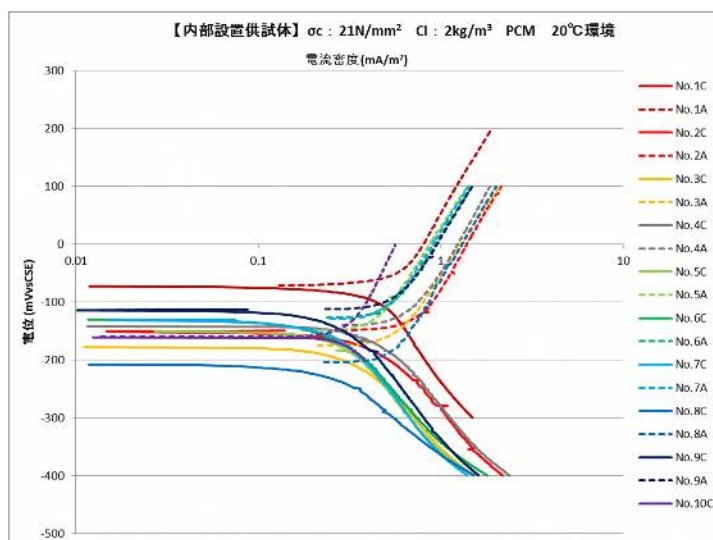


図 4.3.34 A21-2KG-PCM-20D の実測分極曲線

異なる点は、断面修復材内部の鉄筋 No.1 の自然電位は -80mV 程度であるのに対して、最も低い鉄筋 No.8 が -200mV 程度となっており、自然電位のみが異なり、おおむね平行移動したような形となっている。したがって、腐食電流密度は全ての鉄筋であまり差は無く、小さい値を示すものと考えられる。これは測定直前に計測した 6 か月後の分極抵抗の測定結果とも一致する。

躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の外部設置供試体の各分割鉄筋の分極曲線について、内部設置供試体と同様に鉄筋 No.1 から No.10 まではほぼ $0.1\sim 0.5\text{mA/m}^2$ 程度の電流密度で分極が得られるような傾向を示した。したがって、内部設置供試体と同様に腐食電流密度は、現時点では鉄筋腐食がほとんど発生しない程度の小さい値を示すものと考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオン量 2kg/m^3 の設置なし供試体の各分割鉄筋の分極曲線についても内部設置供試体と同様に鉄筋 No.1 から No.10 まではほぼ $0.1\sim 0.5\text{mA/m}^2$ 程度の電流密度で分極が得られるような傾向を示している。躯体コンクリート中の鉄筋も断面修復材中の鉄筋も分極特性に大きな差は無く、全て腐食は見られないものと考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 のシリーズの分割鉄筋の分極曲線を測定した結果を図 4.3.37～図 4.3.39 に示す。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 の内部設置供試体の分極曲線は、断面修復材内部の鉄筋 No.1 については、 0.5mA/m^2 程度で分極が得られるような形となっている。一方、鉄筋 No.10 は 10 倍の 5mA/m^2 程度は必要となっており、分極抵抗が小さくなっていることが示唆される。躯体コンクリート内部の鉄筋では、鉄筋 No.2～4 の犠牲陽極材近傍の鉄筋は断面修復材内部の鉄筋 No.1 に近い位置にアノード分極曲線があるが、鉄筋 No.9～10 はかな

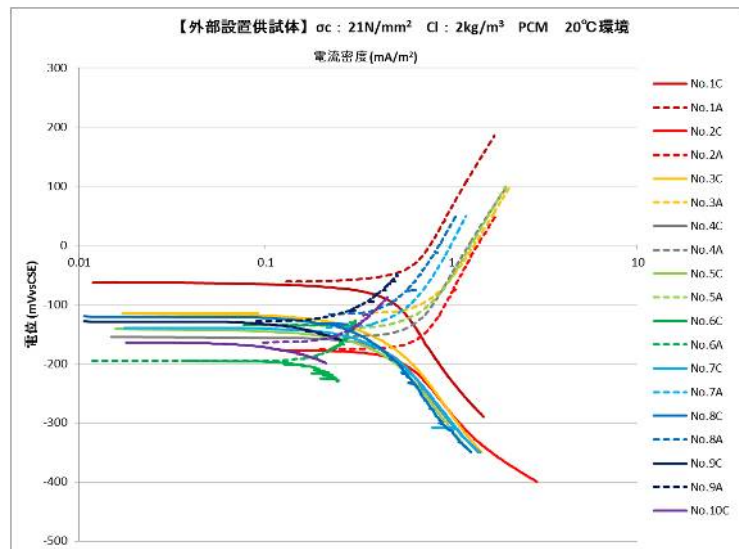


図 4.3.35 B21-2KG-PCM-20D の実測分極曲線

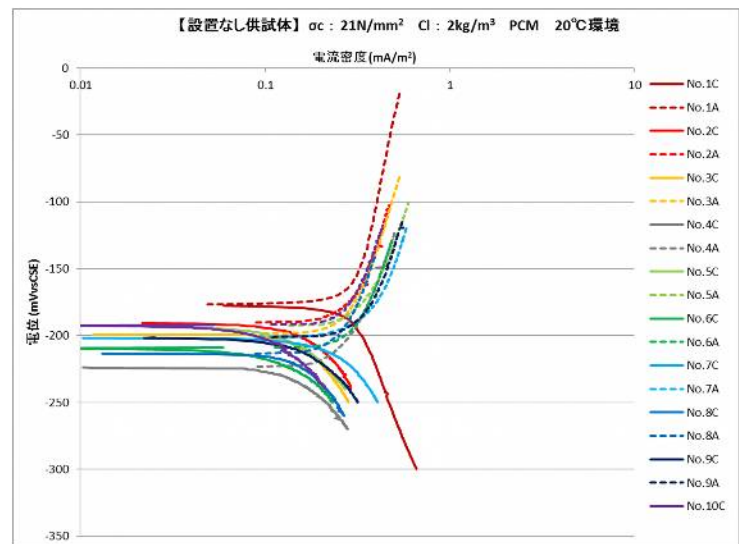


図 4.3.36 N21-2KG-PCM-20D の実測分極曲線

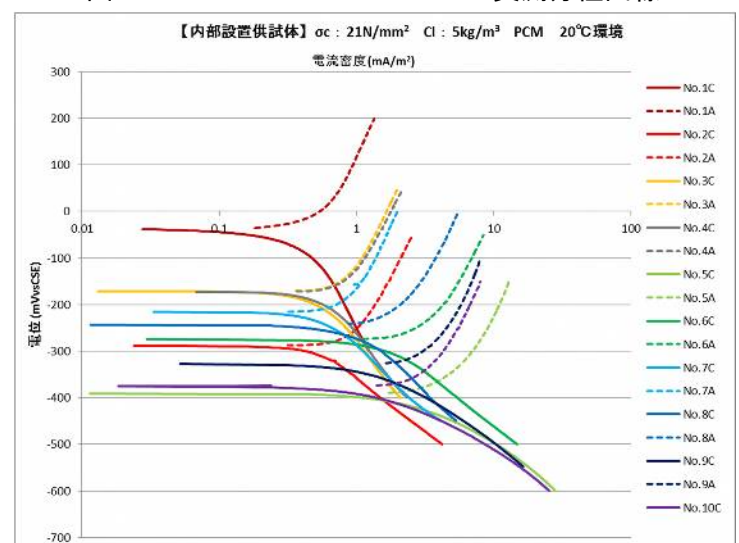


図 4.3.37 A21-5KG-PCM-20D の実測分極曲線

り電流密度が大きい位置にアノード分極曲線が存在する。したがって、躯体コンクリートの塩化物イオンが 5kg/m^3 の内部設置供試体では、躯体コンクリート内部の鉄筋は、犠牲陽極材に近い鉄筋は断面修復材内部の鉄筋に近い程度まで腐食が抑制されているが、犠牲陽極材からの位置が遠くなるにしたがって、鉄筋腐食しやすい環境となっていることが伺える。

躯体コンクリートの塩化物イオンが 5kg/m^3 の外部設置供試体の分極曲線も内部設置供試体と同様に、鉄筋 No.1 と No.10 まで広がりをもったような並び方をしている。断面修復材内部の鉄筋 No.1 については、 0.5mA/m^2 程度で分極が得られるような形となる。一方、鉄筋 No.9 は 10 倍の 5mA/m^2 程度は必要となっており、分極抵抗が小さくなっていることが示唆される。躯体コンクリート内部の鉄筋の分極曲線は大きく 2 グループに分けることができ、鉄筋 No.2～5 の犠牲陽極材近傍の鉄筋のグループは断面修復材内部の鉄筋

No.1 に近い位置にアノード分極曲線があるが、犠牲陽極材から遠い鉄筋 No.6～10 は電流密度が大きい位置にアノード分極曲線が存在している。

躯体コンクリートの塩化物イオンが 5kg/m^3 の分極曲線についても、内部設置供試体と同様に鉄筋 No.1 から No.10 まで広がりをもった形となっている。異なる点は、分極を得るために必要な電流密度が小さい順に、No.5→No.10→No.3→No.2→No.6→No.9→No.7→No.4→No.8 と順番に規則性が無い。躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 で 20°C の室内に 6 か月間静置した本試験条件では、鉄筋の腐食が発生しているものと発生していないものが混在しているものと考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオンが 10kg/m^3 のシリーズの分割鉄筋の分極曲線を測定した結果を図 4.3.40～43 に示す。

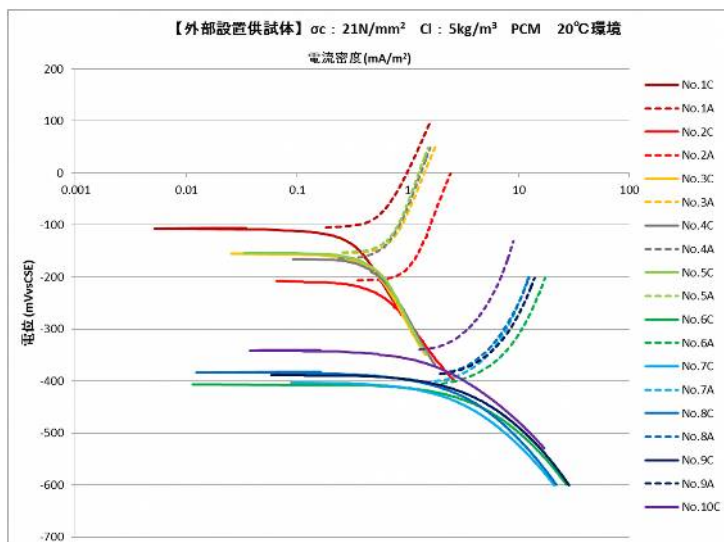


図 4.3.38 B21-5KG-PCM-20D の実測分極曲線

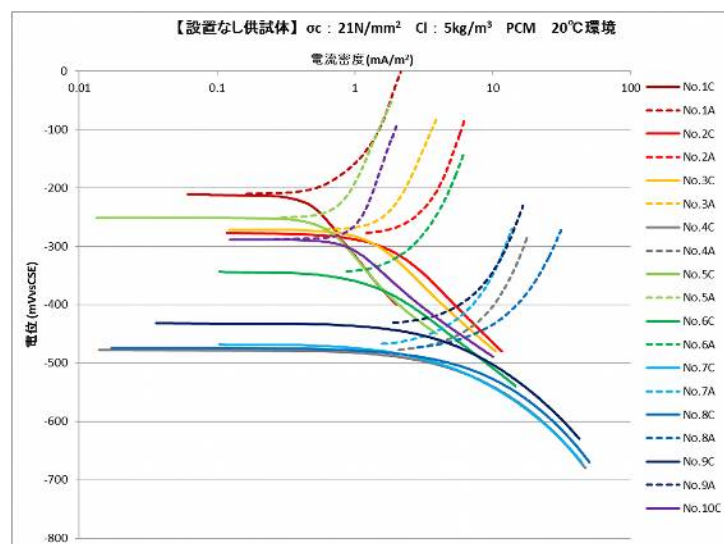


図 4.3.39 N21-5KG-PCM-20D の実測分極曲線

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 の内部設置供試体の分極曲線については、断面修復材内部の鉄筋 No.1 と躯体コンクリート内部の鉄筋の No.2～No.9 の2つのグループに分かれる。躯体コンクリート内部の鉄筋 (No.2～10) の分極曲線はほぼ重なっていて、腐食電流密度はあまり差異が無いと考えられる。本条件の分極抵抗値は躯体コンクリート内部の鉄筋においては、あまり差異が無い結果であったので、おおむねこの傾向と一致する。鉄筋 No.10 は分極を得るための電流密度が No.9 や No.8 の鉄筋に比較して小さくなっている。これは供試体の端の鉄筋であるため、供試体端部からの乾燥の影響も受けることで、腐食の進行が緩慢になっている可能性があるものと考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 の外部設置供試体の各鉄筋の分極曲線についても、内部設置供試体と同様に断面修復材内部の鉄筋 No.1 と躯体コンクリート内部の鉄筋の No.2～No.10 の2つのグループに分かれる。躯体コンクリートの鉄筋の分極曲線もほぼ重なっていて、腐食電流密度はあまり差異が無いが、犠牲陽極材に近い鉄筋 No.2, 3, 4, 5 の分極曲線は中でも電流密度が低い側にある。本条件の分極抵抗の傾向とも一致する。なお、鉄筋 No.10 はこの供試体においても供試体端部からの乾燥の影響を受け、腐食の進行が緩慢になっている可

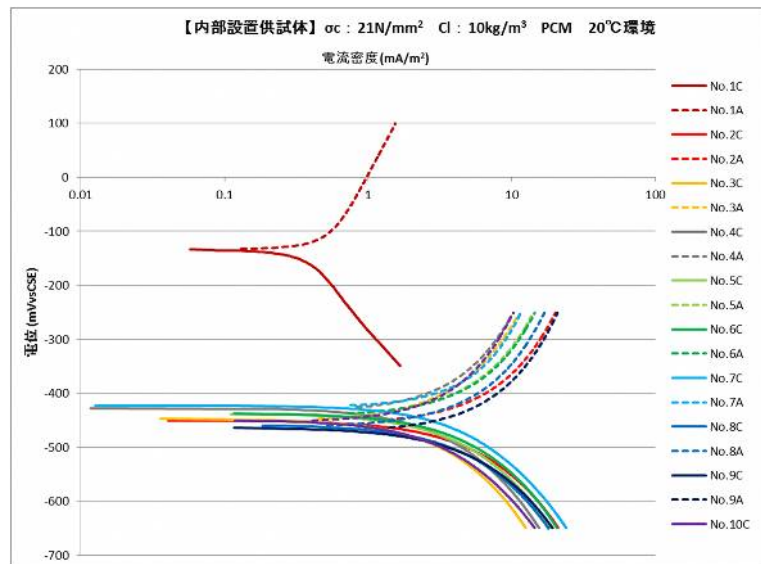


図 4.3.40 A21-10KG-PCM-20D の実測分極曲線

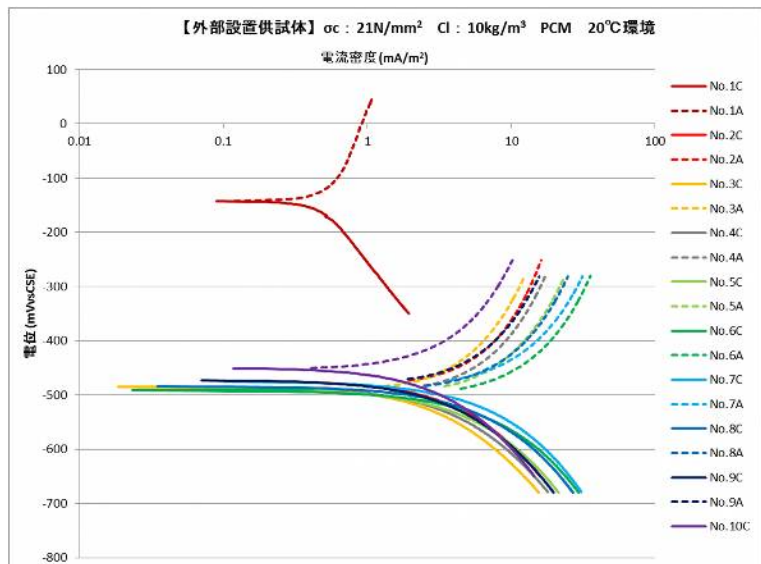


図 4.3.41 B21-10KG-PCM-20D の実測分極曲線

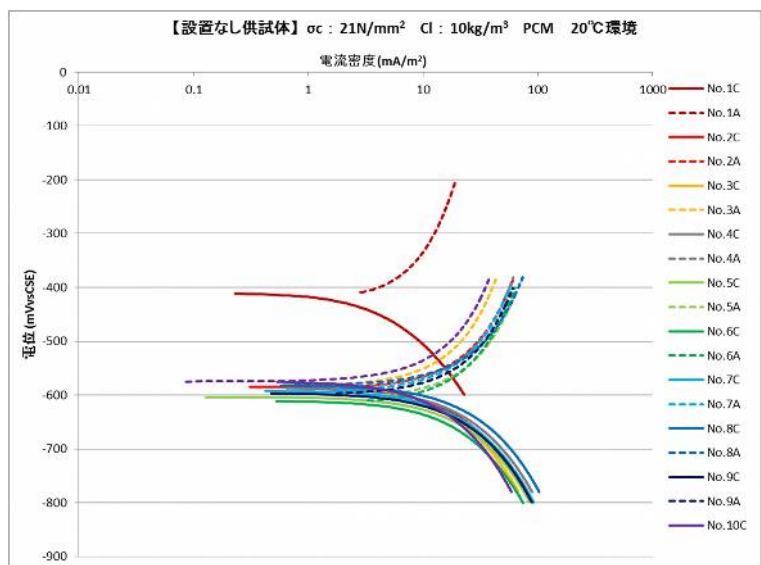


図 4.3.42 N21-10KG-PCM-20D の実測分極曲線

能性があるものと考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 の設置なし供試体の各鉄筋の分極曲線について、断面修復材内部の鉄筋 No.1 と躯体コンクリート内部の鉄筋の No.2～No.10 の 2 つのグループに分かれる。躯体コンクリートの鉄筋の分極曲線はほぼ重なっていて、内部設置供試体や外部設置供試体と同じような傾向を示すが、本試験条件では内部設置供試体および外部設置供試体に比べて躯体コンクリート内部の鉄筋は分極を得るのに大きい電流密度が必要であり、これらの供試体に比べて鉄筋の腐食電流密度は大きいと考えられる。

次に前節の解析手法にしたがって得られた各分割鉄筋の腐食電流のうち、躯体コンクリートの塩化物イオンが 2kg/m^2 のシリーズについて図 4.3.43 に示した。なお、後で示す塩化物イオン量 5kg/m^3 と 10kg/m^3 の結果と比較して、腐食電流密度はかなり低い結果であったので、図の縦軸はこれらの $1/10$ としている。

躯体コンクリートの塩化物イオンが 2kg/m^2 のシリーズは、内部設置供試体、外部設置供試体および設置なし供試体の鉄筋腐食電流密度は小さく、そのため差異もほとんど無い。試験開始から 6 か月の時点では、躯体内の鉄筋は腐食がほとんど進行していないと推定される。

次に図 4.3.44 に躯体コンクリートの塩化物イオンが 5kg/m^2 のシリーズの鉄筋腐食電流密度についてまとめたものを示す。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 のものは、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 のシリーズに比べて、設置なし供試体の腐食電流密度が高く、内部設置供試体および外部設置供試体の腐食電流密度が小さく抑えられていることが確認できる。内部設置供試体および外部設置供試体とも鉄筋 No.2 から鉄筋 No.5 の範囲の腐食電流を大きく抑えており、おおむねこの範

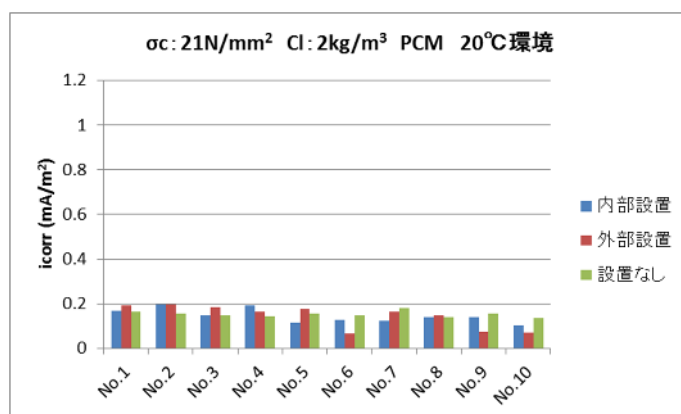


図 4.3.43 塩化物イオン 2kg/m^3 シリーズの鉄筋腐食電流密度

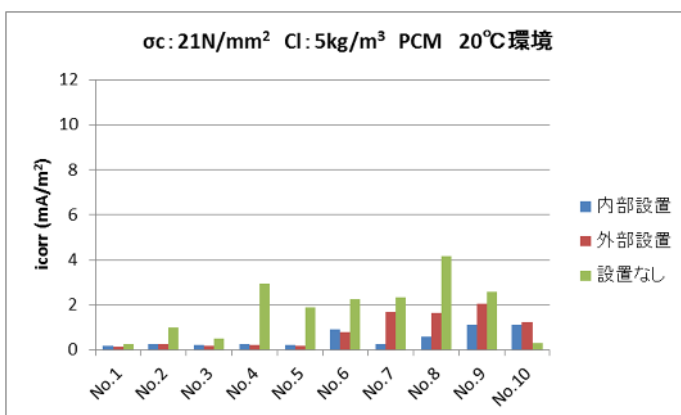


図 4.3.44 塩化物イオン 5kg/m^3 シリーズの鉄筋腐食電流密度

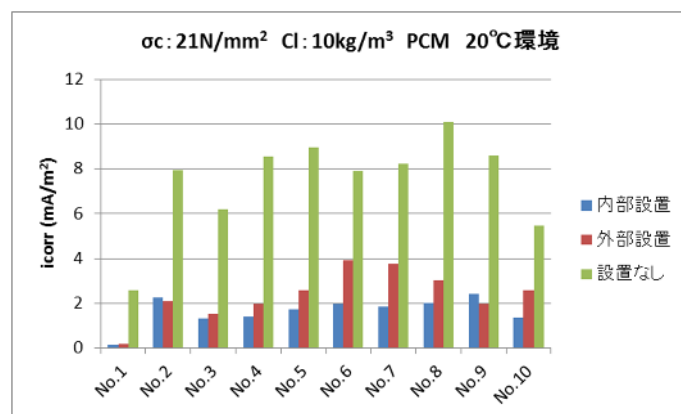


図 4.3.45 塩化物イオン 10kg/m^3 シリーズの鉄筋腐食電流密度

囲が防食範囲と考えられる．なお，この図において，内部設置供試体と外部設置供試体では大きな差異はない．

次に躯体コンクリートの塩化物イオンが 10kg/m^2 のシリーズの鉄筋腐食電流密度についてまとめたものを図 4.3.45 に示す．躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 および 5kg/m^3 のシリーズに比べて，設置なし供試体の腐食電流密度が増大していることがわかる．一方，内部設置供試体と外部設置供試体は躯体コンクリート内部の全ての鉄筋において腐食電流密度が設置なし供試体の $1/5$ から $1/2$ 程度まで抑制しており，高い腐食抑制効果が推定される．中でも鉄筋 No.2 ～No.5 の範囲の抑制効果が高い．

(5) 鉄筋腐食状況

次に，写真 4.3.1 に解体直後の供試体のうち，躯体コンクリートの塩化物イオンが 2kg/m^3 シリーズの状況を示す．

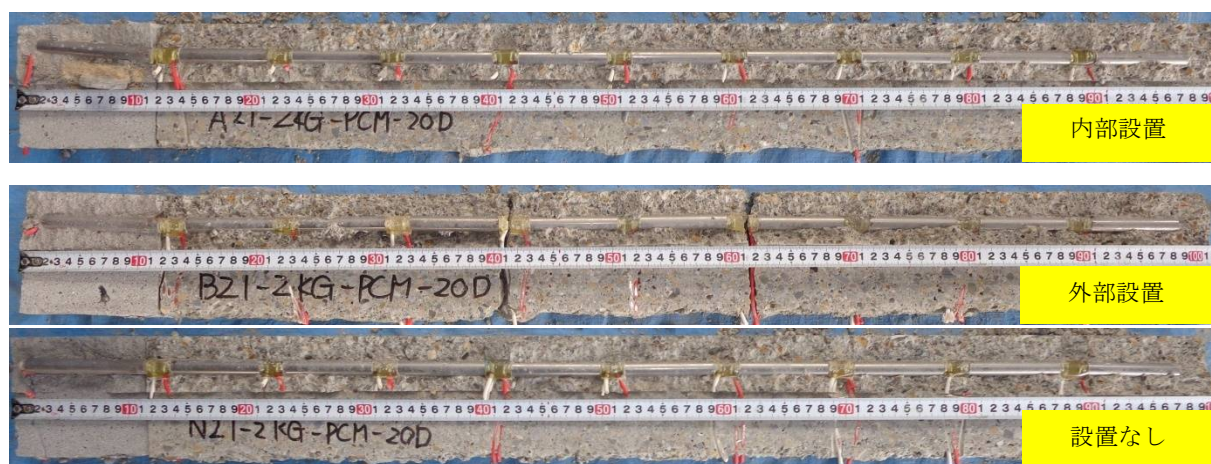


写真 4.3.1 塩化物イオン 2kg/m^3 シリーズの供試体解体直後の状況

写真 4.3.1 より，躯体コンクリートの塩化物イオンが 2kg/m^3 シリーズの鉄筋は内部設置供試体，外部設置供試体および設置なし供試体で全く腐食は見られない状況であった．なお，写真 4.3.2 に N21-2KG-PCM-20D の鉄筋 No.2 の表面の pH を pH 試験紙で簡易的に測定した状況を示す．

写真 4.3.2 より，鉄筋腐食が見られない N21-2KG-PCM-20D の鉄筋 No.2 の表面の pH は高いアルカリ性を保っている状況が確認できる．

写真 4.3.3 に躯体コンクリートの塩化物イオンが 5kg/m^3 シリーズの解体直後の供試体の状況を示す．



写真 4.3.2 鉄筋表面の pH 測定状況

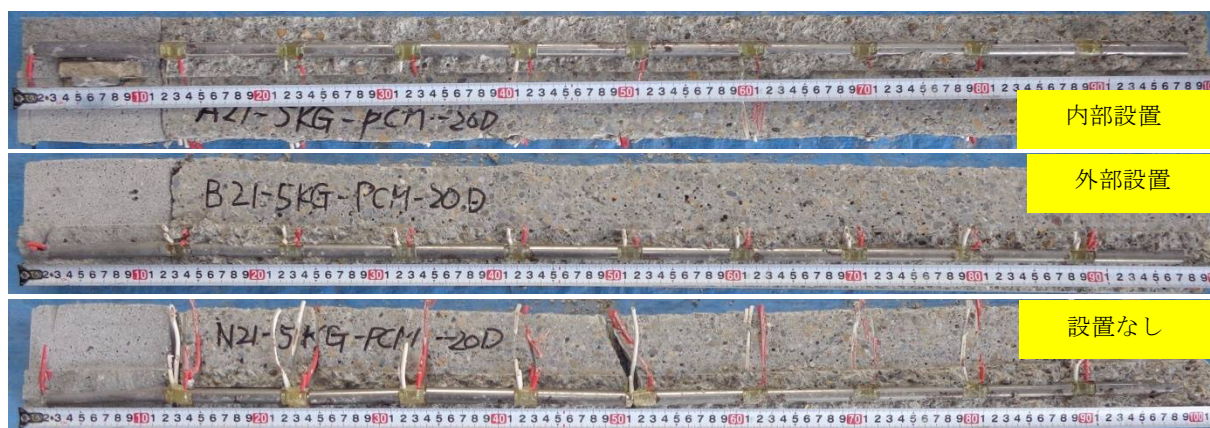


写真 4.3.3 塩化物イオン 5kg/m³ シリーズの供試体解体直後の状況

写真 4.3.3 より、内部設置供試体および外部設置供試体は鉄筋 No.5 までは腐食は見られないが、鉄筋 No.6 では薄い錆が広がっている箇所が観察された。一方、設置なし供試体では、鉄筋 No.3 あたりから錆が観察され、これらの供試体よりも腐食が広がっていることが確認された。

写真 4.3.4 に躯体コンクリートの塩化物イオンが 10kg/m³ シリーズの解体直後の供試体の状況を示す。

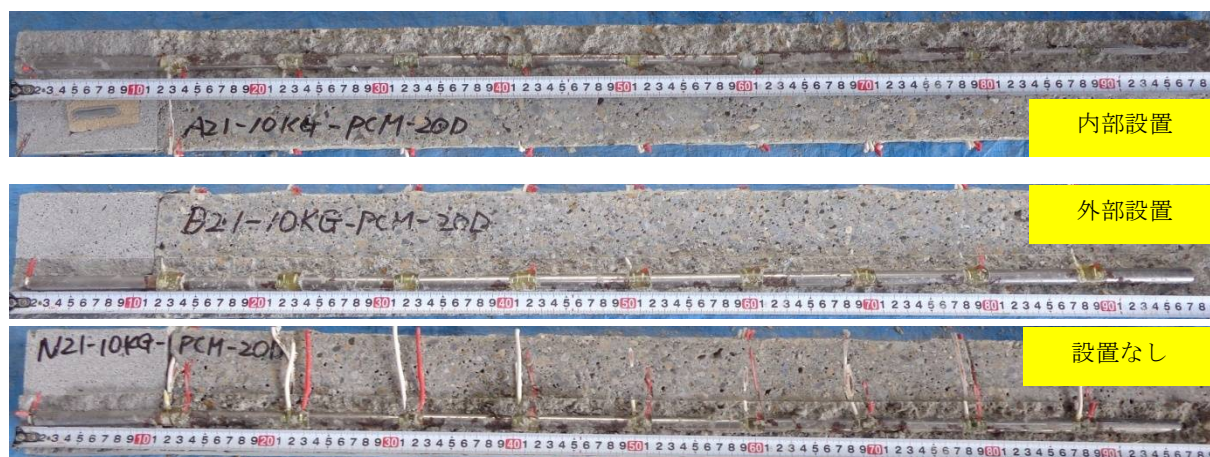


写真 4.3.4 塩化物イオン 10kg/m³ シリーズの供試体解体直後の状況

写真 4.3.4 より、内部設置供試体および外部設置供試体は鉄筋 No.5 までは腐食が少ないが、鉄筋 No.6～10 では薄い錆が広がっている箇所も散見された。一方、設置なし供試体では、No.2 から No.10 にかけて全体的に錆が薄く広がっているようであった。

(6) 鉄筋腐食量

次に図 4.3.46 に各鉄筋を取り出し

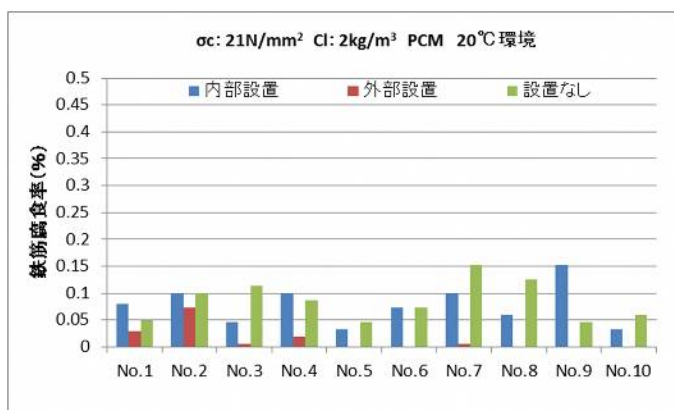


図 4.3.46 塩化物イオン 2kg/m³ シリーズの鉄筋腐食率

て、鉄筋腐食量を測定した結果のうち、躯体コンクリートの塩化物イオンが 2kg/m^3 シリーズの結果を示す。

躯体コンクリートの塩化物イオンが 2kg/m^3 シリーズにおいては、鉄筋腐食率は 0.1% 程度であり錆の進行はほとんど認められない結果となった。

躯体コンクリートの塩化物イオンが 5kg/m^3 シリーズの鉄筋腐食率結果を図 4.3.47 に示す。躯体コンクリートの塩化物イオンが 5kg/m^3 シリーズでは、躯体コンクリート内部の鉄筋 No.2 から No.5 において内部設置供試体および外部設置供試体で腐食抑制効果が認められた。特に外部設置供試体においては、打継面近傍の鉄筋 No.2 および No.3 の腐食抑制効果が高い。

躯体コンクリートの塩化物イオンが 10kg/m^3 シリーズの鉄筋腐食率結果を図 4.3.48 に示す。

塩化物イオン 10kg/m^3 シリーズにおいて、設置なし供試体の鉄筋腐食率が高く、また躯体コンクリート内部の鉄筋間であまり差が無い結果となっている。

一方、内部設置供試体および外部設置供試体では、鉄筋 No.2 から No.5 までの鉄筋で設置なし供試体と比較して腐食抑制効果が認められた。中でも外部設置供試体の鉄筋 No.2 と No.3 の抑制効果が卓越している。外部設置供試体の犠牲陽極材の外部設置による効果が認められる。

(7) 犠牲陽極材からの防食電流量

犠牲陽極材から供給される防食電流量の経時変化を図 4.3.49 に示す。

外部設置供試体においては、試験開始から 2 か月目に電流値の低下がみられたが、3 か月目以降はほぼ 1 か月目の値に戻っており、2 か月目の値は試験環境が乾燥したことに起因すると考えられる。

外部設置供試体の 2 か月目の値を除けば、内部および外部設置供試体とも全体としては、電流量は横ばいか漸減している。躯体コンクリートの比抵抗

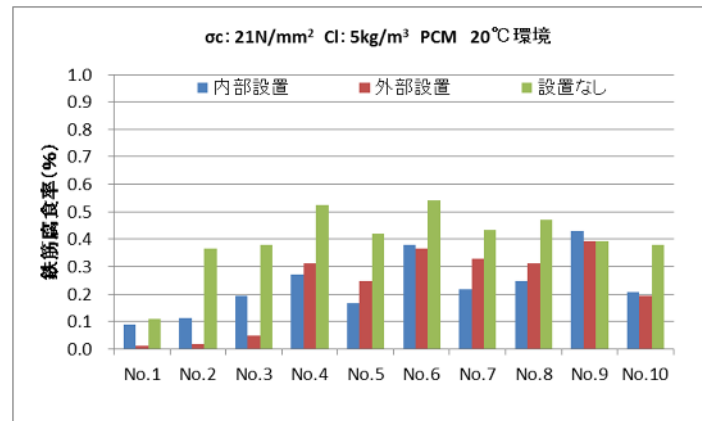


図 4.3.47 塩化物イオン 5kg/m^3 シリーズの鉄筋腐食率

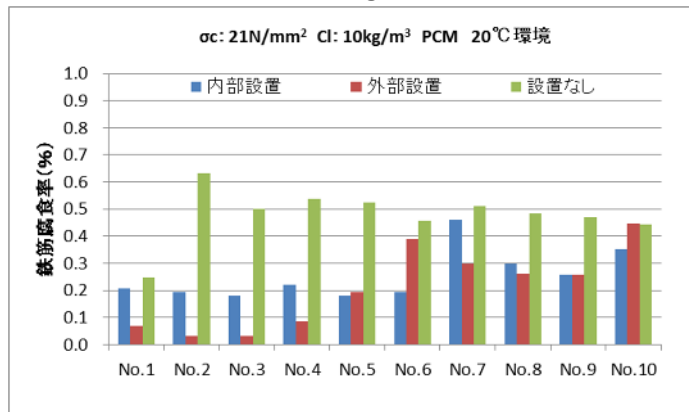


図 4.3.48 塩化物イオン 10kg/m^3 シリーズの鉄筋腐食率

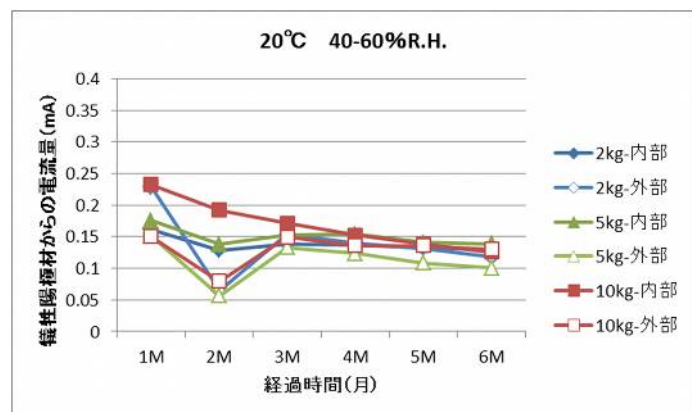


図 4.3.49 犠牲陽極材からの防食電流量

の増加によるものと考えられる。また、躯体コンクリートの塩化物イオン量の違いによって、犠牲陽極材から供給される防食電流量には、多少躯体コンクリート中の塩化物イオン量 10kg/m^3 の内部設置供試体の値が試験開始から 3 か月目あたりまで若干大きい値を示していたが、6 か月の時点ではすべての供試体であまり差はなく、 $0.1\sim 0.15\text{mA}$ の範囲であった。前節で示した 0.4mA 程度の過大な電流値ではないので、犠牲陽極材のバックフィル材の効果も十分発揮できるものと考えられ、今後も同程度の電流を供給し続けることが期待できる。

(8) 鉄筋のマクロセル腐食環境改善効果

犠牲陽極材から防食電流を供給し続けたことによって、躯体コンクリートと断面修復材の界面付近のマクロセル腐食環境がどの程度改善されるかについて、打継界面をはさむ鉄筋の分極曲線から検討を行う。躯体コンクリート中の塩化物イオン量が 2kg/m^3 、 5kg/m^3 および 10kg/m^3 の各供試体の鉄筋 No.1 のカソード分極曲線と鉄筋 No.2 のアノード分極曲線を図

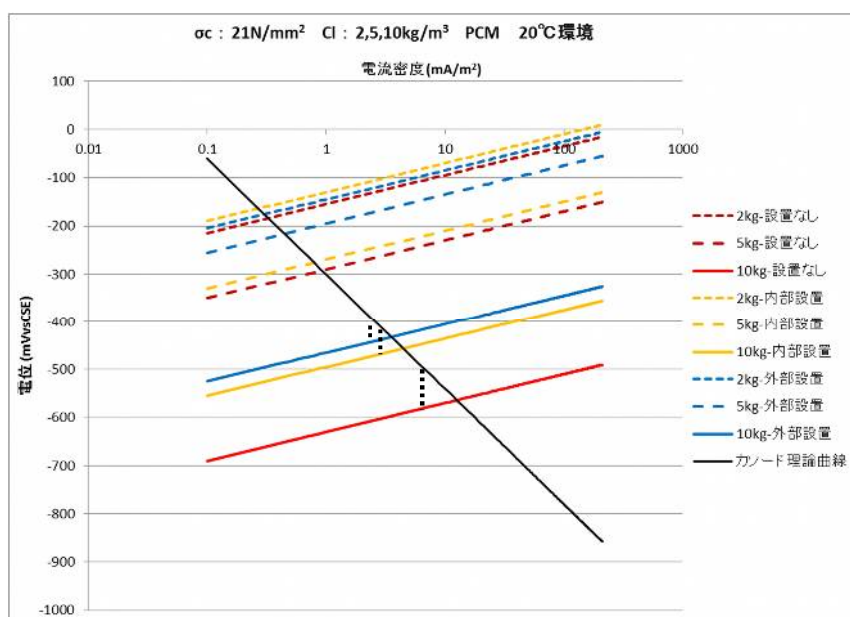


図 4.3.50 鉄筋 No.1 のカソードと鉄筋 No.2 のアノード分極曲線

4.2.33 の手法で整理したものを図 4.3.50 に示す。なお、各供試体の鉄筋 No.1 のカソード分極曲線は 3 つの条件で大きな差がなかったため、カソード分極曲線については、これらを平均化した 1 本の線で示した。前節と同様に IR ドロップを考慮して、図中交点よりも電流密度が低い方にシフトした点線で示した電流密度となる。なお、 1mA/m^2 以下では、IR ドロップは 1mV 以下となるので、ほぼ交点付近の電流密度となる。

躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 で、コンクリート中の塩化物イオン量が 10kg/m^3 の設置なし供試体の打継界面におけるマクロセル腐食の電流密度は約 8.5mA/m^2 であった。同じ条件の内部設置供試体で 6 か月間防食電流を供給し続けたものは、犠牲陽極材を接続しない状態において、打継界面におけるマクロセル腐食の電流密度は約 5mA/m^2 と改善されている。さらに外部設置供試体では、約 4mA/m^2 まで抑制されている。内部設置供試体および外部設置供試体については、犠牲陽極材を接続することで、 100mV 以上卑側に分極されるため、マクロセル腐食電流密度はさらにおおむね 1mA/m^2 以下まで小さくなる。

躯体コンクリート中の塩化物イオン量が 5kg/m^3 の各供試体についても、同様に内部設置供試体と外部設置供試体は設置なし供試体よりもマクロセル腐食電流密度が抑制される効果が認められる。特に外部設置供試体は腐食電流密度が設置なし供試体の 1mA/m^2 から 0.6mA/m^2 程度まで

抑制され、犠牲陽極材を接続することで、さらに 100mV 以上卑側に分極されるため、マクロセル腐食電流密度はほぼゼロになるものと考えられる。

躯体コンクリート中の塩化物イオンが 2kg/m^3 のものは、犠牲陽極材を設置しない設置なし供試体においても、マクロセル腐食電流密度は 0.4mA/m^2 程度と非常に小さく、内部設置供試体と外部設置供試体との差は認められなかった。そもそもマクロセル腐食電流がほとんど発生しないためと考えられる。

以上のことから、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 と 5kg/m^3 の場合について、内部設置供試体および外部設置供試体に打継界面を跨いだマクロセル腐食電流の抑制効果が認められ、その抑制効果は外部設置供試体の方が高いと考えられる。

(9) 犠牲陽極材の防食効果による鉄筋の防食範囲

犠牲陽極材から供給する防食電流により、断面修復材と躯体コンクリート界面からどの程度の距離までの鉄筋に防食効果が認められるかについて、一般的な電気防食工法の指標である復極量と分極抵抗値から検討を前節と同様に行った。

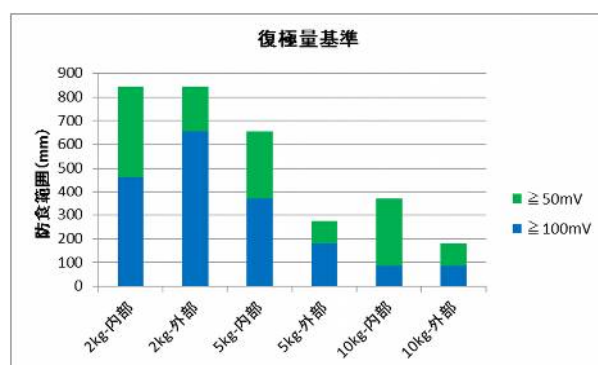


図 4.3.51 復極量基準による防食範囲

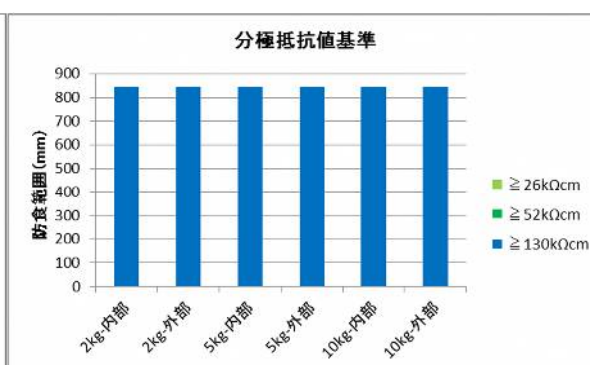


図 4.2.52 分極抵抗値基準による防食範囲

まず、分極抵抗基準においては、すべての分割鉄筋位置で分極抵抗値が $130\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上の値を示し、防食範囲に差がつかなかった。

復極量基準では、躯体コンクリートの塩化物イオン量が増加するに伴い、防食範囲は小さくなる傾向となった。躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 の場合、外部設置供試体の復極量 100mV 以上の範囲は 650mm 程度であるが、内部設置供試体は 450mm 程度であり、外部設置供試体の方が防食範囲は広い結果となった。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 の場合、外部設置供試体の復極量 100mV 以上の範囲は 180mm 程度なのに対して、内部設置供試体は 380mm 程度であった。復極量 50mV の範囲も外部設置供試体は 300mm 程度に対して、内部設置供試体は 650mm 程度と内部設置供試体の方が広い防食範囲であった。

これは、図 4.3.47 で示した鉄筋腐食率の結果から、外部設置供試体は犠牲陽極材近傍の鉄筋の防食効果は非常に高いが、離れた位置の鉄筋の鉄筋腐食率は内部設置供試体よりも大きな腐食率を示しており、防食範囲としては狭くなる結果とも一致する。図 4.3.49 で示したように、犠牲陽

極材からの防食電流量が設置環境の変化により 2 か月目に低下した影響などが考えられる。

躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 の場合も、 5kg/m^3 の場合よりも狭くはなるが、内部設置供試体の方が外部設置供試体より広い防食範囲となった。

4.3.3 本節のまとめ

設置環境が 20°C 、40-60%R.H.で、躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 の条件下で、躯体コンクリートの塩化物イオン量を 2kg/m^3 、 5kg/m^3 、 10kg/m^3 と条件を変えて試験を行った。

- (1) 躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 の時は、試験期間が 6 か月において、犠牲陽極材を設置しない場合でも鉄筋はほとんど腐食しなかった。
- (2) 犠牲陽極材を断面修復材内部に設置する内部設置供試体は、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 の場合、界面付近の鉄筋の腐食を抑制する効果が認められた。
- (3) 犠牲陽極材を打継ぎ界面付近の躯体コンクリートの外側に設置する外部設置供試体は、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 の場合、界面付近の鉄筋の腐食を抑制する効果があり、特に犠牲陽極材を設置した直下にある鉄筋の腐食抑制効果が高かった。
- (4) 犠牲陽極材を断面修復材内部に設置する内部設置供試体は、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 の場合、界面付近の鉄筋の腐食を抑制する効果が認められた。
- (5) 犠牲陽極材を打継ぎ界面付近の躯体コンクリートの外側に設置する外部設置供試体は、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 の場合、界面付近の鉄筋の腐食を抑制する効果があり、特に犠牲陽極材を設置した直下にある鉄筋の腐食抑制効果が高かった。

4.4 断面修復材の種類が犠牲陽極材の防食性能に与える影響

本節では、断面修復工法を模擬した供試体を作製し、塩素固定化材を混和した断面修復材を用いた場合において、犠牲陽極材の防食性能にどのような影響を与えるかについて検討した。

4.4.1 使用材料、試験配合および試験方法

使用材料および内部設置供試体、外部設置供試体および設置なし供試体の仕様は 4.2 節と同様である。表 4.4.1 に本節で検討する供試体の試験条件について示す。

表 4.4.1 作製供試体の試験条件

供試体名	暴露温度	供試体	躯体強度	躯体塩分	断面修復材
A21-10KG-PCA-20D	20°C 40-60%RH	内部 設置	21N/mm^2	10kg/m^3	塩素固定化 剤混和型 PCM
B21-10KG-PCA-20D		外部 設置			※
B21-10KG-PCMPC-20D					

※使用した断面修復材は一般 PCM で、外部の犠牲陽極材設置部に有機-無機複合型被膜養生材を塗布

コンクリート配合は 3.2 節と同じものを使用した。塩素固定化剤混和型 PCM は 2.3 節に示す「PCA5」を使用した。

B21-10KG-PCM-PCMP-20D で使用する有機・無機複合型被膜養生材は、既往の研究²⁰⁾で示される水分逸散を大きく抑制できる被膜養生材である。

供試体の暴露条件は、20℃室内の恒温室に静置した。なお、湿度については計測時期により 40% R.H.から 60% R.H.の間で変動している。

供試体の評価項目およびその試験方法については、4.2 節と同様である。

4.4.2 試験結果

(1) 犠牲陽極材および鉄筋の電位

Eon 電位および Eof 電位の計測結果を図 4.4.1～図 4.4.3 に示す。各電位の値は、3 体の供試体の平均値である。なお以下、電位の記述については特に断りがない限り、飽和硫酸銅（CSE）電極基準である。

断面修復材に塩素固定化材を用いた内部設置供試体について、試験開始から 2 か月後の Eof 電位が異常に貴な値を取ったが、3 か月後以降は通常の値に戻った。異常に貴な値を取った理由は、試験環境が乾燥していたなどの要因が考えられるが、詳細は不明である。また、犠牲陽極材の Eof 電位の 1 か月後の値もその後の値に比べるとかなり貴側の値であった。その他の特徴については、断面修復材が通常の PCM である内部設置供試体とほぼ同じであった。

断面修復材に塩素固定化材を用いた外部設置供試体については、断面修復材が通常の PCM である外部設置供試体とほぼ同じ挙動であった。

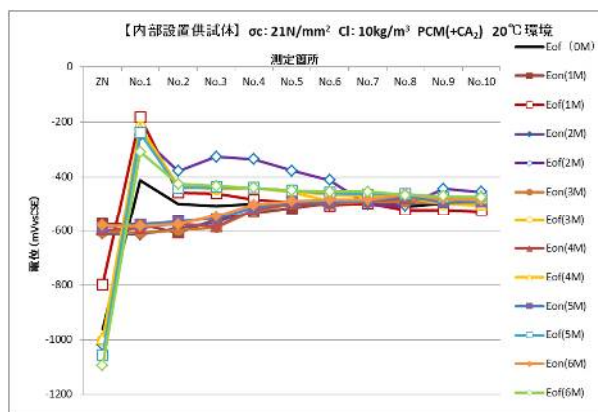


図 4.4.1 A21-10KG-PCA-20D の Eof, Eon 電位

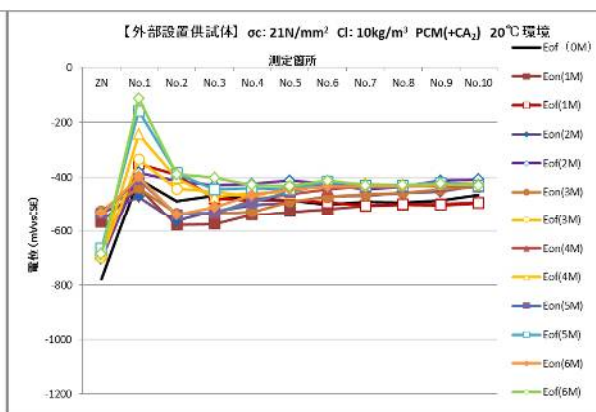


図 4.4.2 B21-10KG-PCA-20D の Eof, Eon 電位

犠牲陽極材設置部に被膜養生材を塗布した外部設置供試体については、鉄筋の Eof 電位が被膜養生材を塗布しない外部設置供試体に比べて、特に鉄筋 No.2 においては、若干ではあるがさらに貴側にシフトしており、鉄筋の腐食環境が改善している可能性があると考えられる。

次に復極量の測定結果を図 4.4.4～6 に示す。

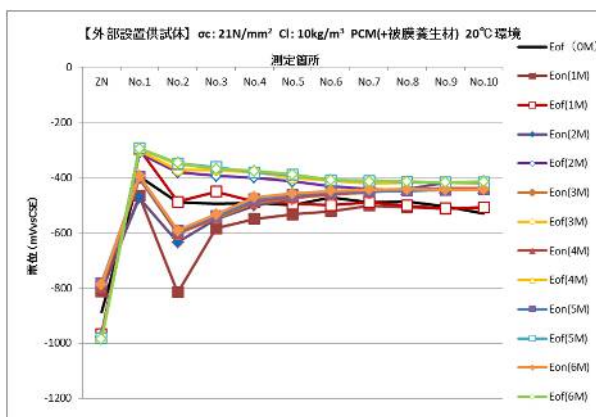


図 4.4.3 B21-10KG-PCMP-20D の Eof, Eon 電位

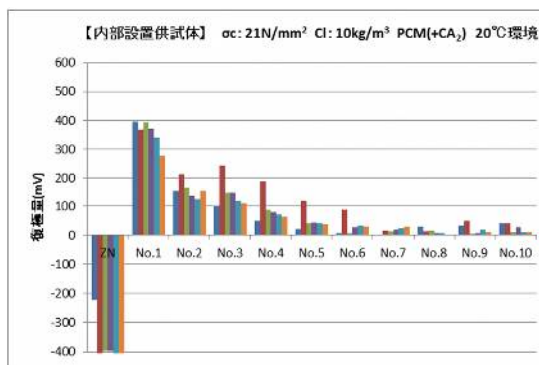


図 4. 4. 4 A21-10KG-PCA-20D の復極量

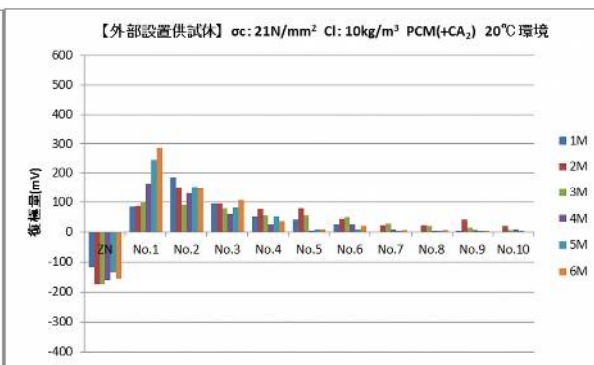


図 4. 4. 5 B21-10KG-PCA-20D の復極量

断面修復材に塩素固定化材を用いた内部設置供試体については、2 か月後の復極量が大きくなっている。これは Eof 電位が異常に貴化したためである。その他については、おおむね通常の断面修復材を用いた内部設置供試体と同じような特徴であるが、6 か月後においても鉄筋 No.3 まで 100mV の復極量を得ている。これに対し、通常の断面修復材を用いた内部設置供試体は鉄筋 No.2 までが 100mV 復極量を得る範囲であるので、防食効果は少し高いものとなると考えられる。

断面修復材に塩素固定化材を用いた外部設置供試体においてもおおむね通常の断面修復材の外部設置供試体と同様であるが、内部設置供試体と同じく、通常の断面修復材の場合では得られなかった鉄筋 No.3 まで 100mV の復極量を得ている。

犠牲陽極材設置部に被膜養生材を塗布した外部設置供試体は被膜養生材を塗布しない外部設置供試体と同じような復極量の特徴を示すが、被膜養生材を塗布しない外部設置供試体と比べて、若干復極量が多く得られる傾向にある。

これは、有機-無機複合型被膜養生材により、犠牲陽極材周囲のモルタルから水分逸散が抑制され、犠牲陽極材内部に湿分が保持され、犠牲陽極材の反応活性度が維持されたからと考えられる。金属の溶解反応は、イオンの溶出が必須であり、そのためには必ず「液相」の水が必要となる。犠牲陽極材のバックフィル材は高アルカリ性を保つためだけでなく、湿分を保つために水酸化リチウムを混和している。水酸化リチウムは潮解性が高く、保湿性に富む。

したがって、有機-無機複合型被膜養生材の塗布による保湿効果で、犠牲陽極材の反応活性が持続しているものと推察される。

(2) 分割鉄筋に流れるマクロセル電流

次にマクロセル電流密度を図 4. 4. 7～4. 4. 9 に示す。

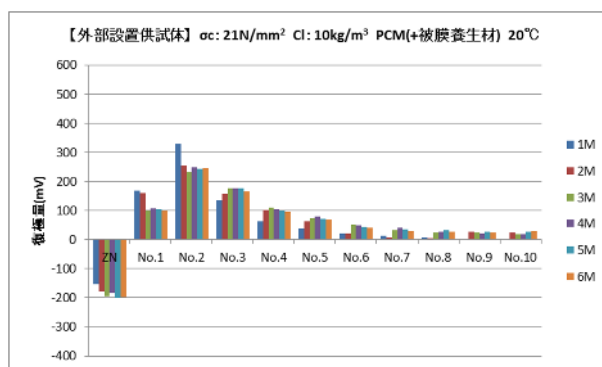


図 4. 4. 6 B21-10KG-PCMPC-20D の復極量

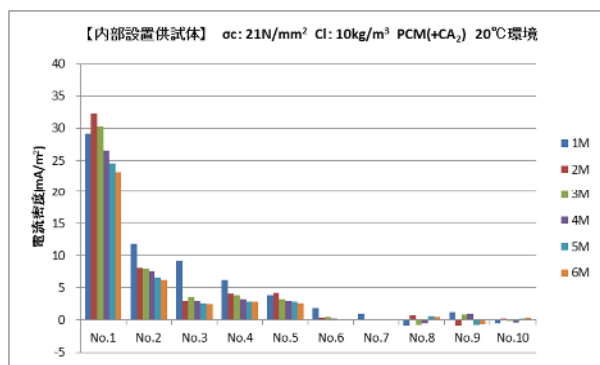


図 4.4.7 A21-10KG-PCA-20D のマクロセル
電流密度

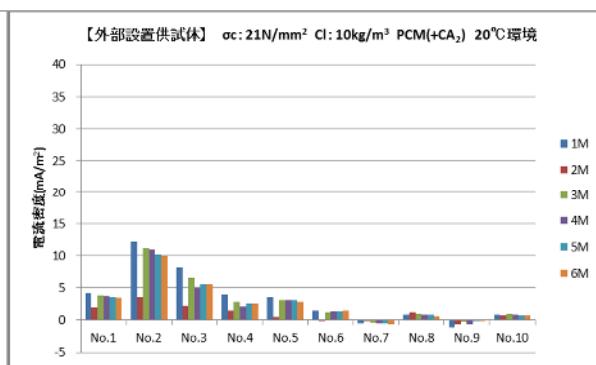


図 4.4.8 B21-10KG-PCA-20D のマクロセル
電流密度

断面修復材に塩素固定化材を用いた内部設置供試体および外部設置供試体のマクロセル電流密度は、通常の断面修復材を用いた内部設置供試体および外部設置供試体と同様の結果となった。断面修復材に塩素固定化材を用いても、犠牲陽極材から供給される防食電流に大きな影響は与えないことが分かった。

犠牲陽極材設置部に被膜養生材を塗布した外部設置供試体については、被膜養生材を塗布しない外部設置供試体よりも高い電流密度を供給している。特に打継界面近傍の鉄筋 No.2 および No.3 では供給している電流密度は 1.5 程度であり、高い防食効果が期待される。

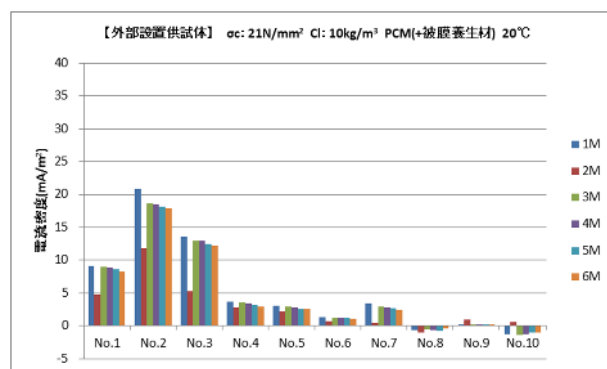


図 4.4.9 B21-10KG-PCMPC-20D のマクロセル
電流密度

(3) 分割鉄筋の分極抵抗

分極抵抗の測定結果を図 4.4.10～4.4.12 に示す。

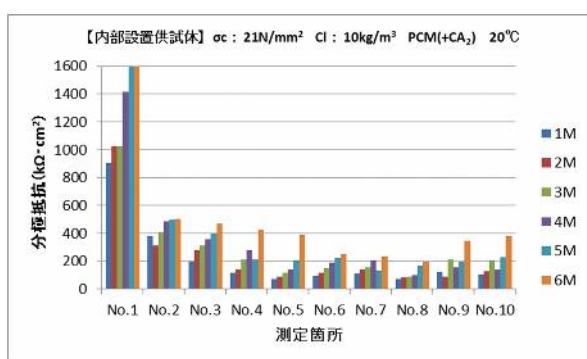


図 4.4.10 A21-10KG-PCA-20D の分極抵抗

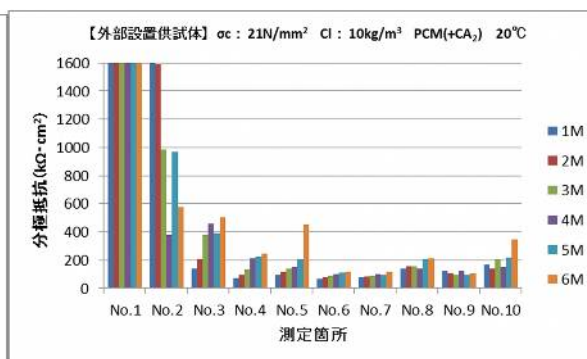


図 4.4.11 B21-10KG-PCA-20D の分極抵抗

断面修復材に塩素固定化材を用いた内部設置供試体は、躯体コンクリート内部の鉄筋 No.2～No.5 の分極抵抗値が全体の中では比較的大きい値となっており、通常の断面修復材を用いた内部設置供試体とほぼ同じ挙動を示している。

断面修復材に塩素固定化材を用いた外部設置供試体の分極抵抗も No.2～No.5 の鉄筋が比較的大きな分極抵抗値となっている。また、塩素固定化材を混和した断面修復材を用いているので、断面修復材に塩素固定化材を用いた内部設置供試体および外部設置供試体ともに、断面修復材内部の鉄筋 No.1 の分極抵抗は特に高い値を示している。

犠牲陽極材設置部に被膜養生材を塗布した外部設置供試体の分極抵抗は、犠牲陽極材近傍の鉄筋 No.2～No.4 の分極抵抗値が特に大きな値を示しており、高い鉄筋腐食抑制性能が期待される。

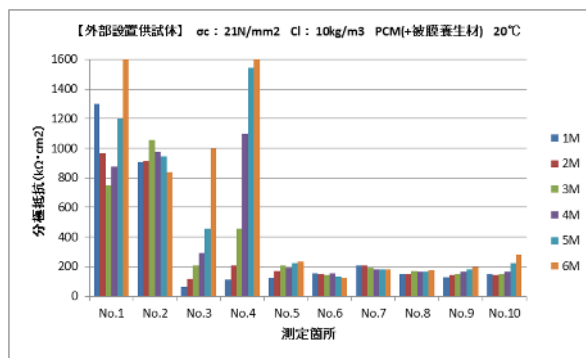


図 4.4.12 B21-10KG-PCMP-20D の分極抵抗

(4) 分割鉄筋の分極曲線

分割鉄筋の分極曲線を測定した結果を図 4.4.13～図 4.4.15 に示す。なお、各分極曲線は既往の文献¹⁸⁾を参考に、分極抵抗を測定した際に計測される抵抗値を用いて IR 補正を行ったものであり、凡例の最後の添え字は C: カソード, A: アノードであることを示す。

断面修復材に塩素固定化材を用いた内部設置供試体の分極曲線は通常の断面修復材を用いた内部設置供試体とほとんど同じであった。すなわち、断面修復材内部の鉄筋 No.1 と躯体コンクリート内部の鉄筋の No.2～No.9 の 2 つのグループに分かれる。躯体コンクリートの鉄筋の分極曲線はほぼ重なっていて、腐食電流密度はあまり差異が無いと考えられる。また、打継界面から遠い位置にある鉄筋 No.10 は分極を得るための電流密度が No.9 や No.8 の鉄筋に比較して小さくなっている。これは供試体の端の鉄筋であるため、供試体端部からの乾燥の影響も受けることで、腐食の進行が緩慢になっている

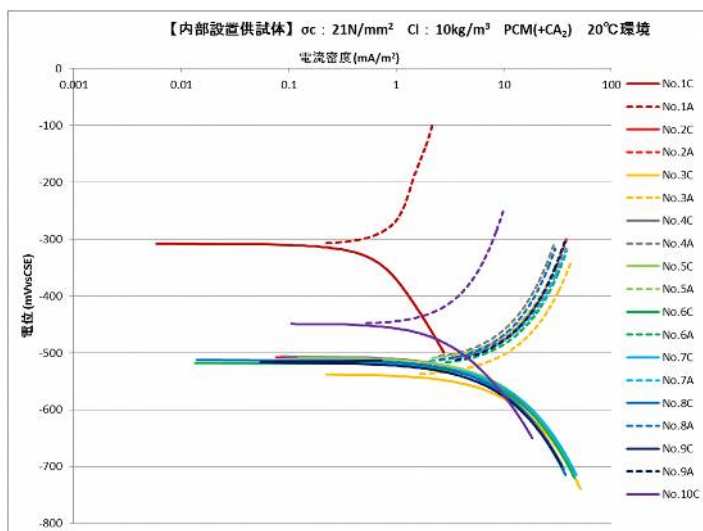


図 4.4.13 A21-10KG-PCA-20D の実測分極曲線

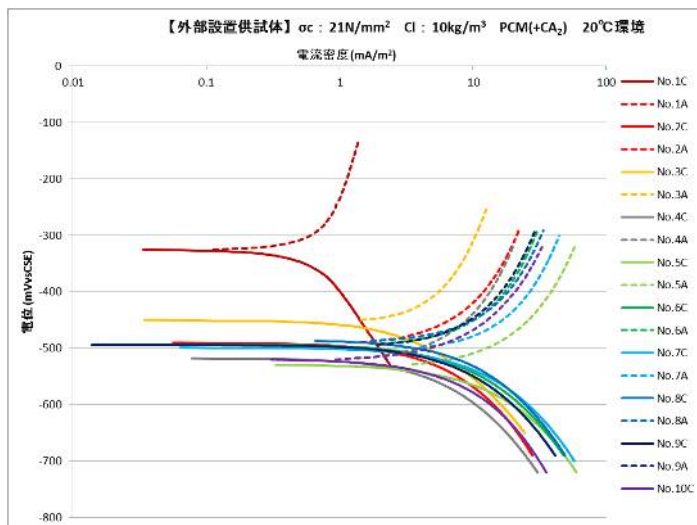


図 4.4.14 B21-10KG-PCA-20D の実測分極曲線

可能性がある。

断面修復材に塩素固定化材を用いた外部設置供試体の各鉄筋の分極曲線について、断面修復材内部の鉄筋 No.1 と躯体コンクリート内部の鉄筋の No.2～No.10 の2つのグループに分かれる。躯体コンクリートの鉄筋の分極曲線はほぼ重なっていて、腐食電流密度はあまり差異が無いが、犠牲陽極材に近い鉄筋 No.2, 3, 4, 5 の分極曲線はその中でも電流密度が低い側にある。

犠牲陽極材設置部に被膜養生材を塗布した外部設置供試体の各鉄筋の分極曲線について、他の躯体コンクリートに塩化物イオン 10kg/m^3 混和したものと比較して、躯体コンクリート内の鉄筋の分極曲線が大きく低電流密度側にシフトしている。特に鉄筋 No.2, 3, 4 の犠牲陽極材に近い鉄筋の腐食改善効果大きい。躯体コンクリート内部の鉄筋の腐食環境が大きく改善している可能性が推測される。

図 4. 4. 16 に 4. 2 節の解析手法にしたがって得られた各分割鉄筋の腐食電流について示した。比較のため、同じ試験条件の設置なし供試体の値も併記する。

塩素固定化材を混和した断面修復材を用いた内部設置供試体および外部設置供試体は、犠牲陽極材付近の鉄筋腐食電流密度を抑え、犠牲陽極材を取り付けない供試体に比べて効果的に鉄筋の腐食を抑制する。一方、犠牲陽極材設置部に被膜養生材を塗布した外部設置供試体は、躯体コンクリート内部の鉄筋でさえも、断面修復材内部の鉄筋と変わらない腐食電流密度となっており、腐食抑制効果は高いものと推定される。

(5) 鉄筋腐食状況

次に、写真 4. 4. 1 に解体直後の供試体を示す。

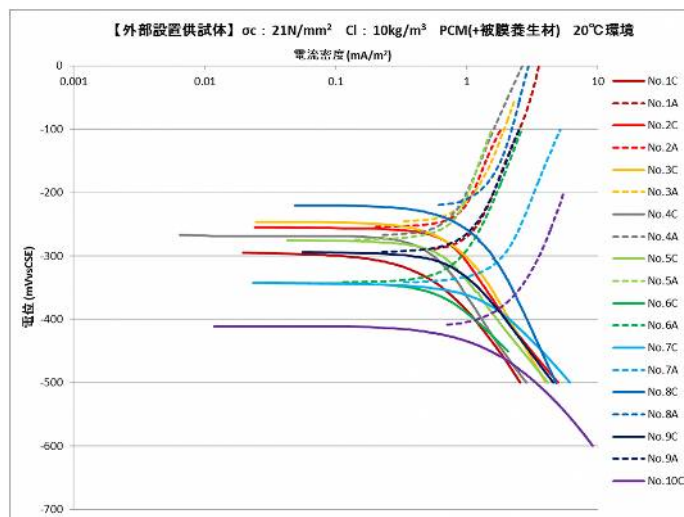


図 4. 4. 15 B21-10KG-PCMP-20D の分極曲線

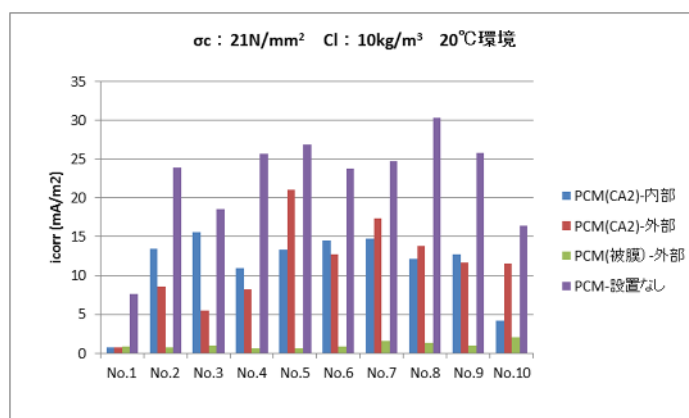


図 4. 4. 16 各供試体の鉄筋腐食電流密度

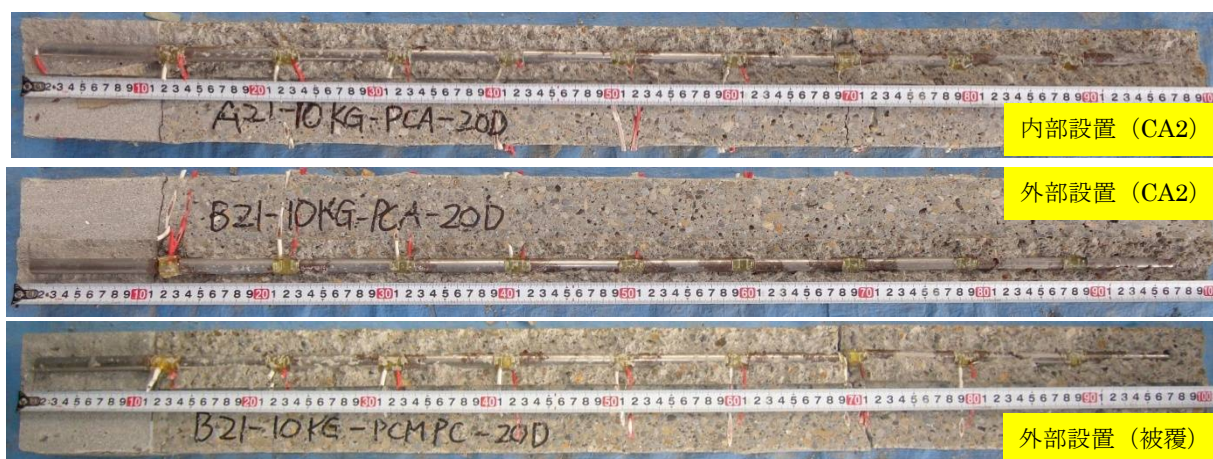


写真 4.4.1 供試体解体直後の状況

写真 4.4.1 より塩素固定化剤混和型 PCM を用いたものは、内部設置供試体および外部設置供試体とも、鉄筋 No.5 までは良好な鉄筋腐食抑制効果を示した。

一方、有機-無機複合型被膜養生材を外部の犠牲陽極材取り付け部に塗布したものは、腐食はゼロにはならず、薄い錆ではあるが錆の発生は認められる状況であった。

また、解体直後の供試体から、外部設置供試体の犠牲陽極材を覆っているモルタルで有機-無機複合型被膜養生材を塗布したものと塗布しないものを採取し、ハンマーで 6mm 以下に破碎し、105℃で 48 時間乾燥させた時の質量減少率を測定した。結果を図 4.4.17 に示す。

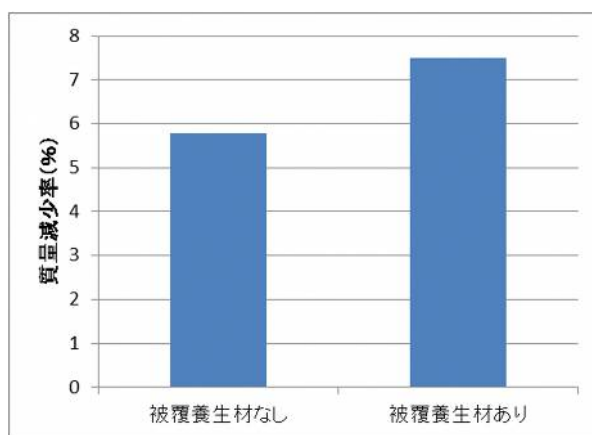


図 4.4.17 有機-無機複合型被膜養生材の保湿効果

図 4.4.17 より、被膜養生材を塗布しないものよりも大きな質量減少率を示しており、有機-無機複合型被膜養生材を塗布した際の保湿効果が確認された。コンクリートは含水率が高い状態ほど比抵抗が低くなることが知られている。被覆養生材を塗布したもののほうが含水率は高いので、犠牲陽極材を覆うモルタルの比抵抗が低くなる。そのため、犠牲陽極材から供給される防食電流が大きくなるものと考えられる。

(6) 鉄筋腐食量

次に各鉄筋を取り出して、鉄筋腐食量を測定した結果を図 4.4.18 に示す。

犠牲陽極材設置部に被膜養生材を塗布した外部設置供試体は最も鉄筋腐食量が小さく、犠牲陽極材を設置

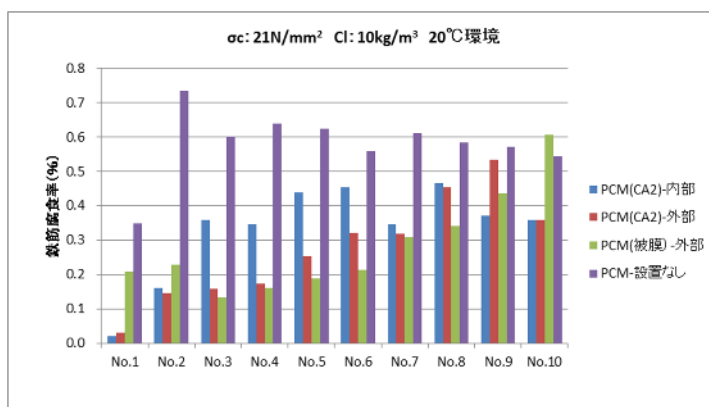


図 4.4.18 鉄筋腐食率

しない設置なし供試体と比較して、鉄筋 No.2～No.7 まで腐食抑制効果が見られた。塩素固定化材を混和した断面修復材を用いた内部設置供試体および外部設置供試体は、特に断面修復材内部の鉄筋 No.1 に対する腐食抑制効果が高いことが確認された。したがって、これらの組み合わせによりさらに効果的な鉄筋腐食抑制効果をもった断面修復工法が実現できるものと考えられる。

(7) 犠牲陽極材からの防食電流量

犠牲陽極材から供給される防食電流量の経時変化を図 4.4.19 に示す。比較として、通常の断面修復材を用いた内部および外部設置供試体の測定値もあわせて示す。

外部設置供試体においては、前節の供試体と同様に試験開始から 2 か月目に電流値の低下がみられたが、同様に 3 か月目以降はほぼ 1 か月目の値に戻っており、2 か月目の値は試験環境が乾燥したことに起因すると考えられる。

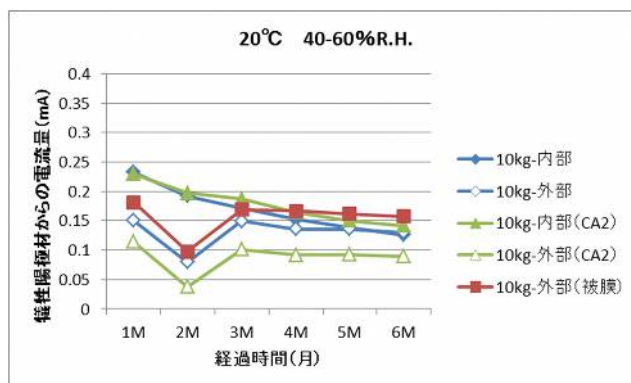


図 4.4.19 犠牲陽極材からの防食電流量

外部設置供試体の 2 か月目の値を除けば、断面修復材に塩素固定化材を使用した内部設置供試体および外部設置供試体も電流量は横ばいかやや漸減している傾向であった。電流値は、おおむね 0.1～0.15mA の範囲であり、前節の同じ環境の供試体とほぼ同じ範囲で推移している。

特に犠牲陽極材設置部に被膜養生材を塗布した外部設置供試体は測定開始当初からの電流値の低下が小さく、また、電流値の大きさも最大値を示している。有機-無機複合型被膜養生材を塗布した際の保湿効果が電流値の低下を抑制している可能性があるものと考えられる。

(8) 鉄筋のマクロセル腐食環境改善効果

犠牲陽極材から防食電流を供給し続けたことによって、躯体コンクリートと断面修復材の界面付近のマクロセル腐食環境がどの程度改善されるかについて、打継界面をはさむ鉄筋の分極曲線から検討を行う。本節で検討した各供試体の鉄筋 No.1 のカソード分極曲線と鉄筋 No.2 のアノード分極曲線を図 4.2.33 の手法で整理したものを図 4.4.20 に示す。比較として、通常の断面修復材を

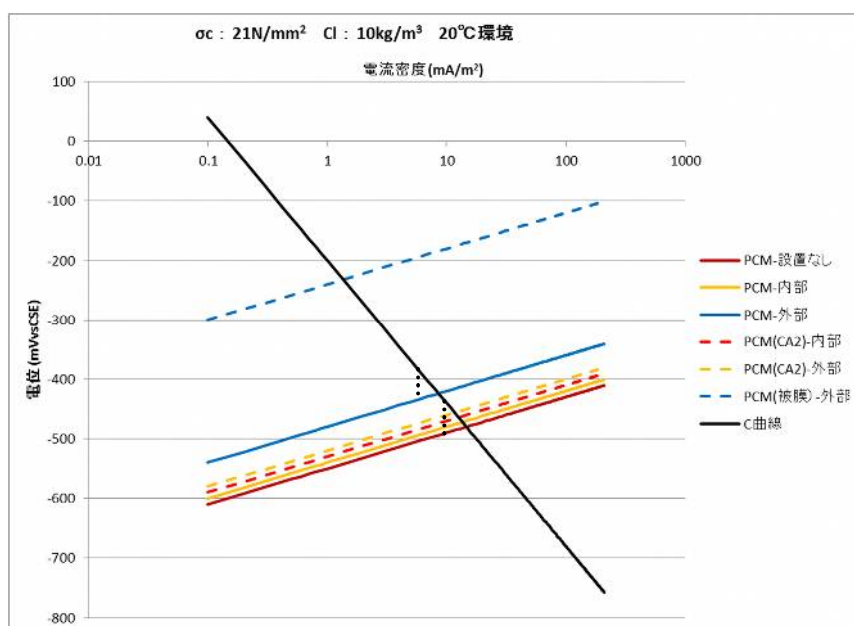


図 4.4.20 鉄筋 No.1 のカソードと鉄筋 No.2 のアノード分極曲線

用いた内部および外部設置供試体の測定値もあわせて示す。

なお、各供試体の鉄筋 No.1 のカソード分極曲線は 3 つの条件で大きな差がなかったため、カソード分極曲線については、これらを平均化した 1 本の線で示した。前節と同様に IR ドロップを考慮して、図中交点よりも電流密度が低い方にシフトした点線で示した電流密度となる。なお、 1mA/m^2 以下では、IR ドロップは 1mV 以下となるので、ほぼ交点付近の電流密度となる。

断面修復材に塩素固定化材を用いた内部設置供試体は、若干ではあるが、犠牲陽極材を用いない設置なし供試体および通常の断面修復材を用いた内部設置供試体と比べて、打継界面におけるマクロセル腐食を抑制する効果が認められた。

断面修復材に塩素固定化材を用いた外部設置供試体は、設置なし供試体よりもマクロセル腐食を抑制する効果が認められたが、通常の断面修復材を用いた外部設置供試体には若干劣るような結果となった。図 4.4.19 より、断面修復材に塩素固定化材を用いた外部設置供試体は、犠牲陽極材から供給される電流量が若干低いため、マクロセル腐食の抑制するほどの鉄筋の腐食環境の改善効果は認められない結果となった可能性が考えられる。

犠牲陽極材設置部に被膜養生材を塗布した外部設置供試体は、他の供試体よりも格段にマクロセル腐食の抑制効果が認められる。これは、図 4.4.19 より、犠牲陽極材からの電流量が最も大きく、また、図 4.4.9 より鉄筋 No.2 に供給された電流密度も 15mA/m^2 程度と最も大きいため、鉄筋腐食環境が大きく改善したものと考えられる。

したがって、打継界面近傍のマクロセル腐食の抑制効果を意図して犠牲陽極材を設置する場合は、外部設置供試体のような外付けとし、犠牲陽極材設置部はなるべく乾燥の影響を受けないような被膜養生材などの対策をとったものとする、高い効果を得ることができると分かった。

(9) 犠牲陽極材の防食効果による鉄筋の防食範囲

犠牲陽極材から供給する防食電流により、断面修復材と躯体コンクリート界面からどの程度の距離までの鉄筋に防食効果が認められるかについて、一般的な電気防食工法の指標である復極量と分極抵抗値から検討を前節と同様に行った。

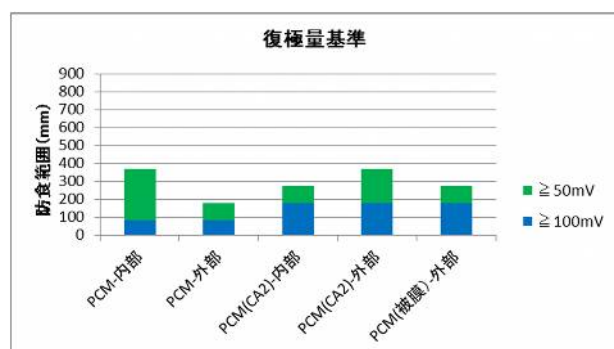


図 4.4.21 復極量基準による防食範囲

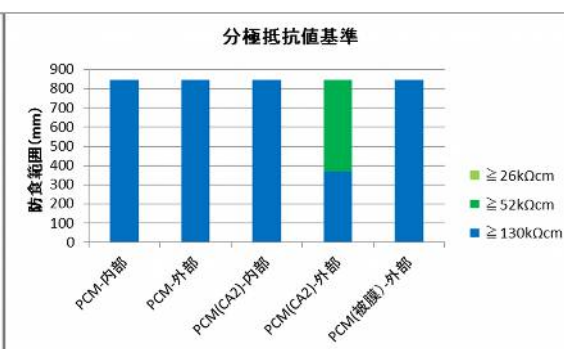


図 4.4.22 分極抵抗値基準による防食範囲

まず、分極抵抗基準においては、塩素固定化材を用いた断面修復材の外部設置供試体のみ、 400mm よりも遠い位置の鉄筋が「低～中程度の腐食速度」となり、若干防食範囲が狭くなる結果となった。

一方、復極量基準においては、塩素固定化材を用いた断面修復材の外部設置供試体が最も広い防食範囲を示した。塩素固定化材を用いた方が、100mV 復極を基準とすると広い防食範囲となるが、塩素固定化材の使用の有無や犠牲陽極材の設置部分における被膜養生材の塗布により、防食範囲には大きな差は認められず、100mV 復極量基準で 100～200mm、50mV 復極量基準で 200～300mm 程度の防食範囲となった。

防食範囲については、犠牲陽極材設置する場所や断面修復材の種類にはあまり影響は受けず、設置する環境に大きな影響を受けるようである。

4.4.3 本節のまとめ

設置環境が 20℃、40-60%R.H.で、躯体コンクリート強度が 21N/mm² で塩化物イオン量が 10kg/m³ 条件下で、断面修復材に塩素固定化材を混和したポリマーセメントモルタルと、【外部設置供試体】において外部設置の犠牲陽極材を覆う一般ポリマーセメントモルタルに有機-無機複合型被膜養生材を塗布する条件に変えて試験を行った。

- (1) 有機-無機複合型被膜養生材を塗布すると、モルタル内部の保湿効果が高まる。
- (2) 塩素固定化材を混和したポリマーセメントモルタルを断面修復材に用いると、特に断面修復材内部の鉄筋の防食効果が高くなる。
- (3) 外部設置供試体の犠牲陽極材設置部に有機-無機複合型被膜養生材を塗布したものは、特に界面付近の鉄筋の防食効果が高くなる。

4.5 犠牲陽極材の鉄筋防食性能の評価手法

本節では、前節まで検討した断面修復工法と併用する犠牲陽極材の鉄筋防食性能について、その評価手法についての検討を行う。その検討の中で、犠牲陽極材の鉄筋防食性能の判定基準についての検討も行う。

4.5.1 鉄筋質量減少率と各パラメータの比較

本節では、鉄筋防食効果を評価するに際し、鉄筋の防食効果を直接評価できる鉄筋質量減少率を基本の指標とし、それに対して復極量、分極鉄筋に流れる防食電流密度、分極抵抗および分極曲線から算出した腐食電流密度と比較し、どのパラメータで評価するのが適切か検討を行うことを目的とする。

前節までに検討した各供試体のうち、犠牲陽極材を設置した内部設置供試体と外部設置供試体の各分割鉄筋の鉄筋質量減少率と復極量の関係を図 4.5.1 に、同じく各分割鉄筋に流れる防食電流密度との関係を図 4.5.2 に示す。なお、復極量と防食電流密度は、鉄筋を取り出す直前の値である試験開始から 6 か月後の値である。

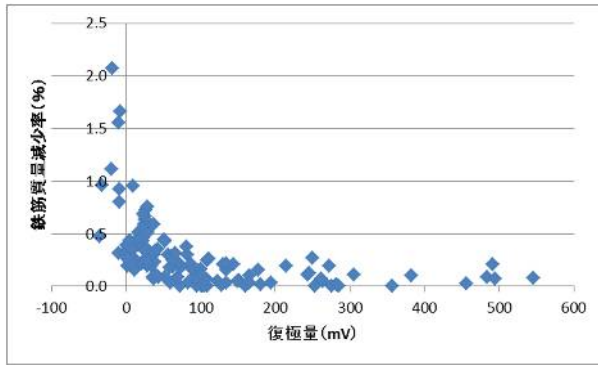


図 4.5.1 鉄筋質量減少率と復極量の関係

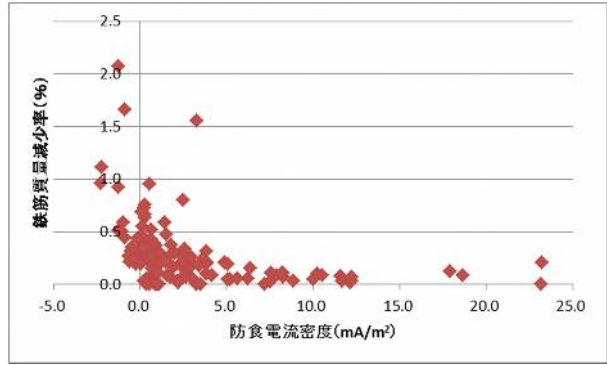


図 4.5.2 鉄筋質量減少率と防食電流密度との関係

復極量と鉄筋質量減少率の関係より、復極量が大きくなるほど、鉄筋質量減少率が小さくなる傾向が認められる。鉄筋質量減少率はおおむね復極量 100mV 未満では大きく増加するようである。一方、一般的な防食の基準とされる復極量 100mV が確保されていれば、0.5%以下の鉄筋質量減少率となり、良好な鉄筋防食状態であると評価できる。

防食電流密度と鉄筋質量減少率の関係より、防食電流密度が大きくなるほど、鉄筋質量減少率が小さくなる傾向が認められる。鉄筋質量減少率は概ね防食電流密度 5.0mA/m²を境にそれ以下では大きく増加し、それ以上では 0.5%以下の鉄筋質量減少率となり、良好な鉄筋防食状態であると評価できる。

次に、検討するパラメータとして分極抵抗値と分極曲線から算出した鉄筋腐食電流密度を検討する。分極抵抗値を計測できる内部設置供試体、外部設置供試体および設置なし供試体全ての供試体の鉄筋における鉄筋質量減少率と分極抵抗値との関係を図 4.5.3 に、鉄筋質量減少率と鉄筋腐食電流密度との関係を図 4.5.4 に示す。

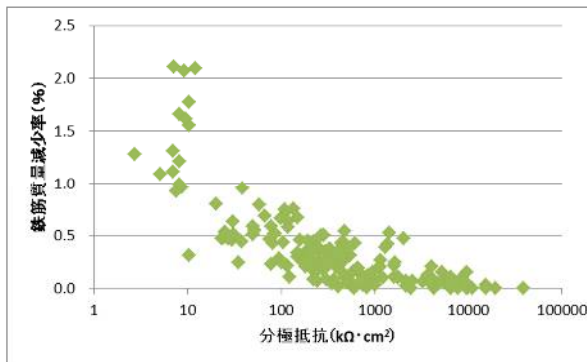


図 4.5.3 鉄筋質量減少率と分極抵抗との関係

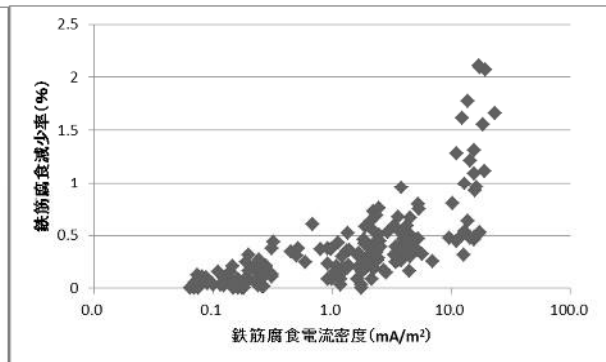


図 4.5.4 鉄筋質量減少率と鉄筋腐食電流密度との関係

分極抵抗値と鉄筋質量減少率の関係から、分極抵抗値が大きくなるほど、鉄筋質量減少率が小さくなる傾向が認められる。鉄筋質量減少率はおおむね 100kΩ・cm²を境にそれ以下では増加し、それ以上ではおおむね 0.5%以下の鉄筋質量減少率となる。CEB の基準で「腐食なしまたはきわめて遅い腐食速度」の基準値である「130 kΩ・cm²以上」とほぼ一致する結果となった。

鉄筋腐食電流密度と鉄筋質量減少率の関係については、鉄筋腐食電流密度が大きくなるほど、鉄筋質量減少率が大きくなる傾向が認められる。鉄筋腐食電流密度がおおむね 1.0～5.0mA/m²

以上から鉄筋質量減少率は大きく増加しており，鉄筋の防食効果を得るには，鉄筋腐食電流密度をおおむね $1.0\sim 5.0\text{mA/m}^2$ 以下に抑える必要があると考えられる．

以上の検討結果から，検討対象としたパラメータはどれも鉄筋質量減少率とは高い相関が得られ，鉄筋の防食効果が得られるおおまかな閾値も確認できた．

4.5.2 犠牲陽極材の鉄筋防食効果の評価指標

本節では，犠牲陽極材の鉄筋防食効果の評価指標について検討する．2章で検討したように，犠牲陽極材を用いた鉄筋防食工法では，防食電流を供給することにより，鉄筋を卑側に分極させ鉄筋腐食の電流密度を小さくすることで防食を行う．復極量はこの分極量の指標である．一方，鉄筋の分極抵抗および鉄筋の腐食電流密度は，各鉄筋の腐食環境がどの程度であるかを評価する指標であり，犠牲陽極材の鉄筋防食効果を間接的に評価する指標であるが，直接評価する指標ではないと考えられる．したがって，本節では，犠牲陽極材の鉄筋防食効果の評価指標として，前節で検討した項目のうち，防食電流密度と復極量を検討の対象とする．

次に，鉄筋防食の度合いを示す指標について，供試体解体時の鉄筋質量減少率をもとに，犠牲陽極材を用いない無防食供試体の各分割鉄筋の鉄筋質量減少率と犠牲陽極材を用いた防食供試体の各分割鉄筋の鉄筋質量減少率から求めた鉄筋防食率を用いることにした．鉄筋防食率は式(4.5.1)により算出した．

$$(\text{鉄筋防食率}) = \frac{(\text{無防食供試体の鉄筋質量減少率}) - (\text{防食供試体の鉄筋質量減少率})}{(\text{無防食供試体の鉄筋質量減少率})} (\%)$$

・・・式 (4.5.1)

まず，分割鉄筋の防食電流密度と鉄筋防食率の関係を図4.5.5に示す．

防食電流密度と鉄筋防食率の関係から，防食電流密度が増加すると鉄筋防食率が増加する傾向にあることが認められる．また，図より防食電流密度が 0mA/m^2 以上の時，鉄筋防食率がおおむね 0% 以上である閾値が認められる．この他に防食電流密度が 1mA/m^2 以上の時，鉄筋防食率が 20% ，防食電流密度が 4mA/m^2 以上の時で鉄筋防食率が 50% 以上となるようである．これらの値を鉄筋防食率の評価基準として採用した場合，

防食電流密度と鉄筋防食率の関係について，各防食電流密度の範囲における鉄筋防食率の値が，どの程度の割合で設定した鉄筋防食率の値の範囲を満たしているのかについて，表4.5.1に示す．

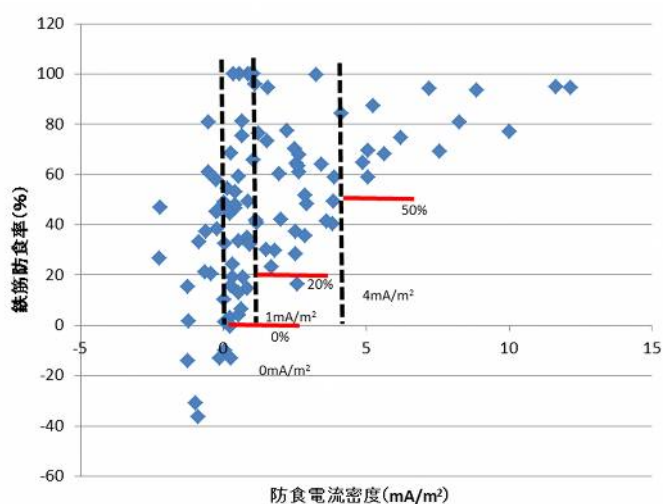


図 4.5.5 防食電流密度と鉄筋防食率の関係

表 4.5.1 防食電流密度と鉄筋防食率の評価基準と該当確率

防食電流密度 (mA/m ²)	鉄筋防食率 (%)	該当確率
0 以上 1.0 未満	0 以上	96%
1.0 以上 4.0 未満	20 以上	97%
4.0 以上	50 以上	100%

表 4.5.1 より、前述のように設定した防食電流密度と鉄筋防食率の評価基準は、90%以上の確率で設定した鉄筋防食率の範囲を満たしており、鉄筋防食率の評価基準として考慮できると考えられる。

次に復極量と鉄筋防食率の関係を図 4.5.6 に示す。

復極量と鉄筋防食率の関係から、復極量が増加すると鉄筋防食率も増加する傾向にあることが確認される。

ここで図より、復極量が 50mV 以上の時、鉄筋防食率が 20%以上、復極量が 100mV 以上の時、鉄筋防食率が 50%以上の閾値があるように認められる。そこで防食電流密度との関係と同様に、設定した復極量の評価基準と鉄筋防食率の関係について、どの程度の割合で設定した鉄筋防食率の値の範囲を満たしているのかについて、表 4.5.2 に示す。

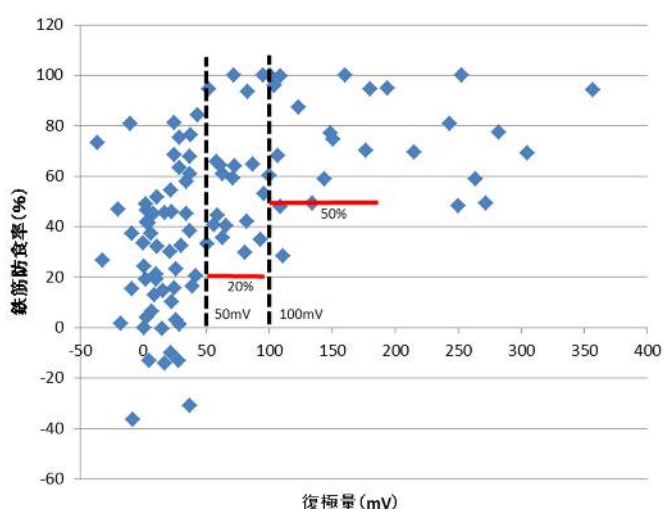


図 4.5.6 復極量と鉄筋防食率の関係

表 4.5.2 復極量と鉄筋防食率の評価基準と該当確率

復極量 (mV)	鉄筋防食率 (%)	該当確率
50 以上 100 未満	20 以上	100%
100 以上	50 以上	93%

表 4.5.2 より、復極量と鉄筋防食率の評価基準は、90%以上の確率で設定した鉄筋防食率の範囲を満たしており、鉄筋防食率の評価基準として一定の基準値となりうると考えられる。ここで、鉄筋防食率が 0%以上の基準として設定できる復極量の評価基準値を設定できなかった。この点について考察する。本研究では、鉄筋の腐食電流密度は実測で得られた鉄筋の分極曲線から、既知の理論曲線を用いて腐食電流密度を

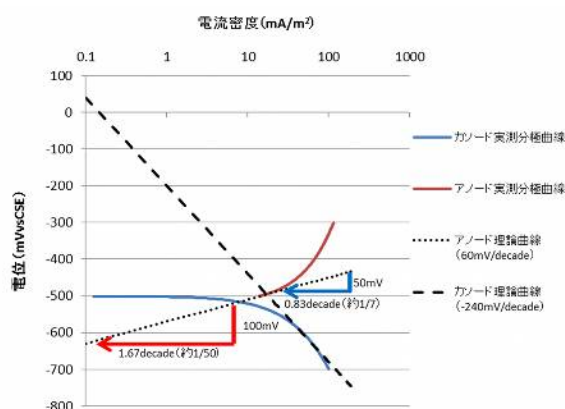


図 4.5.6 復極量と腐食電流密度の抑制率の関係

算出している。したがって、100mVの復極量は、アノード理論曲線上では、図4.5.6に示すように腐食電流密度は1/50程度まで抑制する状態を指すことになる。また、復極量50mVの場合は、腐食電流密度は1/7程度まで抑制することになる。つまり、復極量は鉄筋腐食速度をどの程度抑制しているかを示す指標ということになる。したがって、復極量が50mVに満たなくても復極量がプラスであれば多少なりとも鉄筋腐食速度は抑制していると考えられるが、本研究においては躯体コンクリートの塩化物イオン量が10kg/m³で環境温度が35℃の厳しい鉄筋腐食条件の供試体も含まれており、50mV未満では、激しい鉄筋腐食条件のものは鉄筋腐食が抑制できないものもあると考えられ、測定結果がマイナスになるもの出てくるなどしてバラつき、明確な閾値が認められなかったものと考えられる。

一方、本研究で測定される分割鉄筋の防食電流密度は、各分割鉄筋のマクロな鉄筋腐食が防食側(マクロカソード)なのか腐食側(マクロアノード)なのかを示す指標¹¹⁾であると考えられる。したがって、防食電流値がプラスであれば少なくとも無防食供試体よりは防食効果があると考えられ、実際の測定結果でもそのような傾向が認められた。

以上の検討を踏まえ、鉄筋防食率が0%以上であれば、鉄筋防食効果があるとする、本研究で検討した犠牲陽極材を用いた防食工法の供試体の鉄筋防食効果の評価基準として、「防食電流密度0mA/m²以上」とすることができると考えられる。同様に鉄筋防食率が20%以上では「防食電流密度1.0mA/m²以上」もしくは「復極量50mV以上」を評価基準とすることができ、鉄筋防食率が50%以上では「防食電流密度4.0mA/m²以上」もしくは「復極量100mV以上」を評価基準とすることができると考えられる。これらに評価基準を表4.5.3にまとめる。

表 4.5.3 鉄筋防食の評価基準

鉄筋防食の度合	鉄筋防食率 (%)	防食電流密度 (mA/m ²)	復極量 (mV)
低	0 以上	0 以上 1.0 未満	—
中	20 以上	1.0 以上 4.0 未満	50 以上 100 未満
高	50 以上	4.0 以上	100 以上

ここで、実際の供試体において、鉄筋防食の度合が「中」である、鉄筋防食率が20%、防食電流密度1mA/m²および復極量50mV以上となる範囲を図4.5.7に示す。

図中の横軸は、各条件における供試体の略号であり、例えば「A40-10KG-35D」は「犠牲陽極材内部設置の内部設置供試体、躯体コンクリート強度が40N/mm²、塩化物イオン量が10kg/m³、暴露環境条件が35℃」であることを示す。

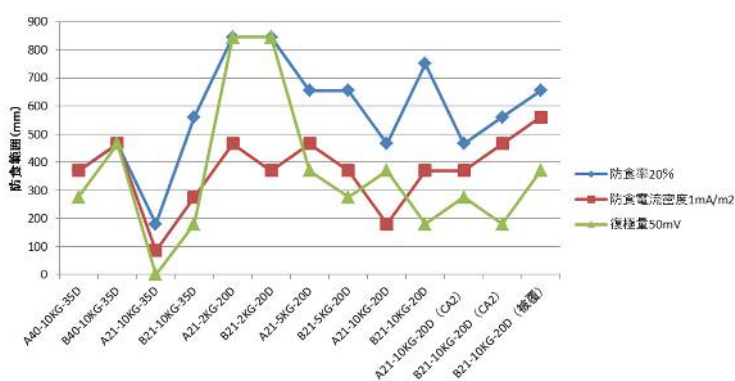


図 4.5.7 各評価指標における鉄筋防食が「中」と評価される防食範囲

基準となる鉄筋防食率 20%以上となる範囲は、評価指標である防食電流密度 1mA/m^2 以上および復極量 50mV 以上の評価基準で推定される防食範囲よりもおおむね広い範囲であることが認められる。これは他の防食率（0%、50%）でも同様の傾向であり、防食電流密度と復極量による評価基準はおおむね安全側に評価できるものであるといえる。

また、図より、鉄筋防食率 20%以上を満たす基準で評価すると、すべての供試体において 200mm 程度以上の防食範囲を有しており、犠牲陽極材を設置したすべての供試体が「腐食抑制効果」を発揮していることも認められる。

4.5.3 本節のまとめ

本節では、鉄筋の防食効果を評価する指標と基準値について検討を行った。

- (1) 復極量、防食電流密度、分極抵抗および分極曲線から算出した腐食電流密度を防食効果の評価パラメータとして検討し、どのパラメータも評価項目として妥当な閾値をもったものであることを確認した。
- (2) 鉄筋の防食効果を鉄筋防食率で評価し、その評価指標として防食電流密度および復極量を検討した結果、各々鉄筋防食率の評価指標として妥当な基準値をもつことが認められた。
- (3) 断面修復工法に犠牲陽極材を併用する防食工法は、暴露環境や躯体コンクリート中の塩化物イオン量にもよるが、断面修復界面から $200\text{mm}\sim 800\text{mm}$ 程度の位置にある鉄筋にも「鉄筋防食抑制効果」を発揮する工法であることが確認された。

4.6 犠牲陽極材の防食効果の数値解析

本節では、犠牲陽極材を設置した躯体コンクリート強度 21N/mm^2 のシリーズの供試体の犠牲陽極材の防食効果について、測定した分極曲線をもとに供試体内部の電位と電流について数値解析の検討を行った。

4.6.1 数値解析手法について

(1) 解析モデル

解析モデルは4.2節で電気化学的測定を実施した図4.6.1に示す試験体を模擬したものとする。端部より 880mm までを躯体コンクリート部(コンクリート)、その他を補修材部(断面修復材)とする。鉄筋は $\phi 13\text{mm}$ 、かぶり 20mm の位置に、基材部には 75mm ずつ 9 本、補修材部には 100mm の長さで配置している。犠牲陽極材は亜鉛を犠牲陽極とするものとし、【内部設置供試体】は断面修復材内部に、【外部設置供試体】は鉄筋 No.2 のコンクリート表面に設置したものとする。

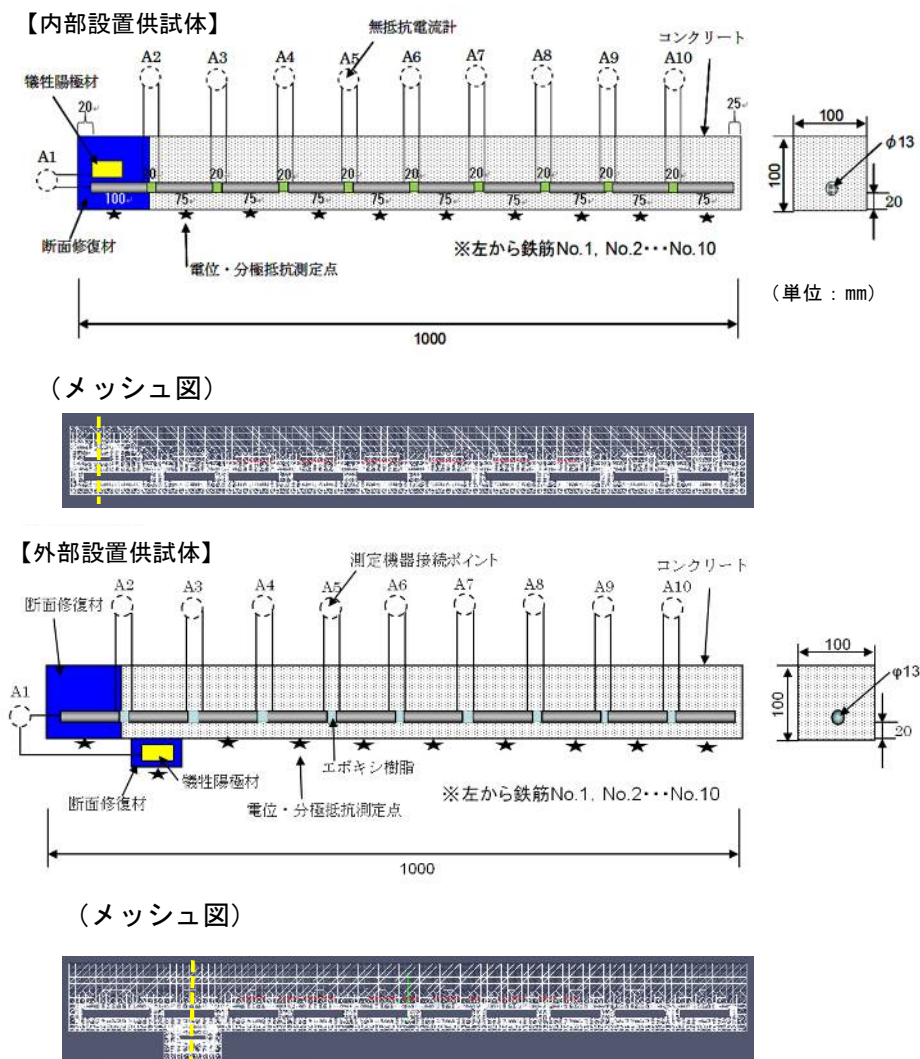


図 4. 6. 1 解析対象モデル

(2) 解析手法

青木ら²¹⁾の研究によると、物体表面の電流密度分布や電位が重要なガルバニック腐食およびカソード防食問題の解析を行う解析手法としては、差分法、有限要素法および境界要素法が考えられるが、内部の要素分割を必要としない境界要素法が入力の手間や計算時間の点で最も有利とされている。したがって、本研究においても図 4. 6. 1 に示された犠牲陽極材を設置した鉄筋コンクリート供試体について、三次元境界要素解析を実施することとした。

(3) 支配方程式

青木ら²¹⁾の研究にしたがって、下記の方程式を支配方程式とした。

①電位の保存式 (ラプラス方程式)

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{式 (4. 6. 1)}$$

(単位：mm)

但し、 ϕ は電位を示す。

②領域境界条件

- $\phi = 0$: コンクリート表面
 $\phi = f_a(q)$: 鉄筋および犠牲陽極上 (アノード)
 $\phi = f_c(q)$: 鉄筋及び犠牲陽極上 (カソード)

$f_a(q)$ と $f_c(q)$ はアノードとカソードの分極特性を表す非線形関数である。

ここで、一般に分極曲線は式 (4.6.2) で示すターフェルの式であらわされる。

$$f_a \text{ or } f_c = \alpha * \log(q) - \beta \quad \text{式 (4.6.2)}$$

ここで、 q は電流密度、 k はコンクリートの電気伝導率、 $\partial/\partial n$ は外向き法線方向の微分であり、式 (4.6.3) から算出できる。

$$q = -k \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad \text{式 (4.6.3)}$$

(4) 境界条件の離散化

式 (4.6.3) と式 (4.4.4), (4.4.5) は同じ境界条件で同時に満足する必要がある。本節では次の手順計算で離散化を行った。図 4.6.1 の供試体のうち、内部設置供試体において測定した、犠牲陽極材 (アノード) と鉄筋 (カソード) の分極曲線を躯体コンクリートの塩化物イオン量別 (2kg/m³, 5kg/m³, 10kg/m³) に、図 4.6.2~4 に示す。

例えば、図 4.6.2 より、アノード (犠牲陽極材) 側では電流密度が大きくなると電位が貴側に推移する。

$$\phi_a = \alpha * \log(q) - \beta \quad \alpha > 0 \quad \text{式 (4.6.4)}$$

カソード (鉄筋) 側では電流密度が大きくなると電位は卑側に推移する。

$$\phi_c = \alpha * \log(q) - \beta \quad \alpha < 0 \quad \dots \text{式 (4.6.5)}$$

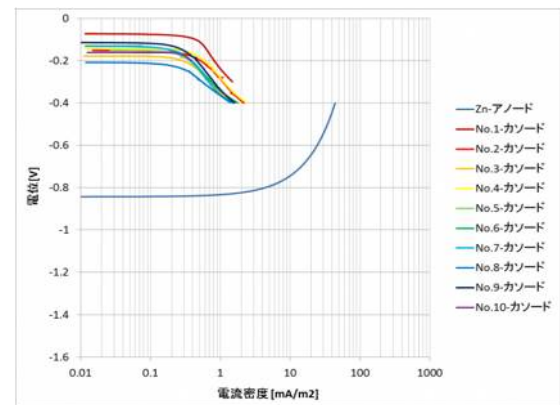


図 4.6.2 躯体コンクリート中の塩化物イオン量 2kg/m³ の分極曲線

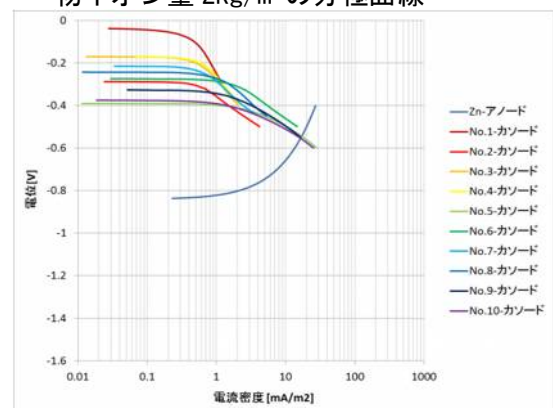


図 4.6.3 躯体コンクリート中の塩化物イオン量 5kg/m³ の分極曲線

式(4.6.3)を用いてはじめに電流密度を計算し、式(4.6.4)、(4.6.5)を用いて境界面の電位を計算する。ここで、式(4.6.3)から算出した電流密度を q^0 とすると、 q^0 は式(4.6.6)のようにあらわされる。

$$q^0 = -k \frac{\partial \phi^0}{\partial n} \quad \dots \text{式(4.6.6)}$$

次に、電流密度の範囲の最大値 q_{\max} と、最小値 q_{\min} を指定する。

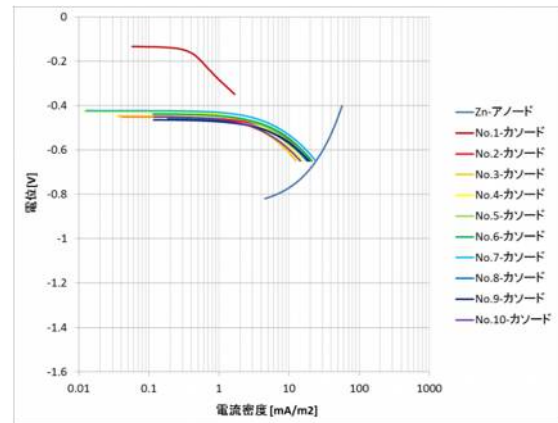


図 4.6.4 躯体コンクリート中の塩化物イオン量 10kg/m³ の分極曲線

$$\delta = \min[\lambda(q_{\max} - q_{\min}), 0.5 * |q^0 - q^0|] \quad \text{式(4.6.7)}$$

ここで q^0 前時間ステップの電流密度
 λ 緩和係数 (例えば, $\lambda=0.02$)

緩和係数 λ は時間ステップ毎に電流密度の変化幅を制限する。今回はテスト試算では 100 ステップ程度で収束したため、経験的に $\lambda=0.02$ に設定した。

新たな電流密度は次の式で算出する。

$$q^n = \begin{cases} \min(q^0 + \delta, q_{\max}) & q^0 < q^0 \\ \max(q^0 - \delta, q_{\min}) & q^0 > q^0 \end{cases} \quad \text{式(4.6.8)}$$

さらに、式(4.6.4)、式(4.6.5)から新しい電位 ϕ^n を算出する。

図 4.6.2～4 に示される各分割鉄筋および犠牲陽極材の分極曲線については、測定された分極曲線を任意の位置で 10 分割した直線で近似した。

以下に計算手順のフローを示す。

・計算手順フロー

- ① 時間ステップを更新
- ② 前の時間ステップの内部領域の計算結果の電位 ϕ^0 から、各領域の電流密度を算出 (式(4.6.6)～(4.6.8))
- ③ 各領域の電流密度から電位を算出 (式(4.6.2))
- ④ 電場計算を行い、新しい電位 ϕ^n を算出 (式(4.6.1))
この時、アノードとカソードの電位は固定値とする。
- ⑤ 収束の判断
操作①に戻る

(5) 入力値

入力条件を表 4.6.1 に示す。比抵抗は 4.2 節で測定した見かけの比抵抗値である。

表 4. 6. 1 入力値

入力条件	Case 1 Cl - : 2kg/m ³	Case2 Cl - : 5kg/m ³	Case3 Cl - : 10kg/m ³
犠牲陽極材表面積 (mm ²)	3400	3400	3400
鉄筋表面積補修材部 (mm ²)	4082	4082	4082
鉄筋表面積コンクリート部 (mm ²)	3061.5×9 本	3061.5×9 本	3061.5×9 本
比抵抗 (補修材部) (kΩ・cm)	424.4	444.8	278.1
比抵抗 (コンクリート部) (kΩ・cm)	105.1	77.8	97.5

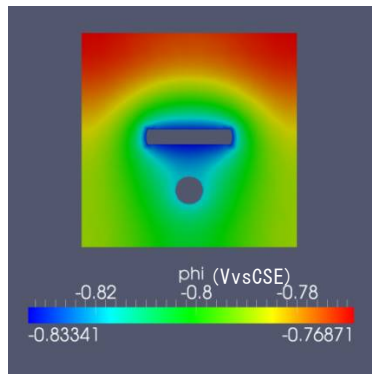
(6) 初期条件

全計算領域の電位は -500mV と仮定した。犠牲陽極材と鉄筋の初期電位は分極曲線にしたがって電流密度 0.01mA/m^2 の時の電位とした。

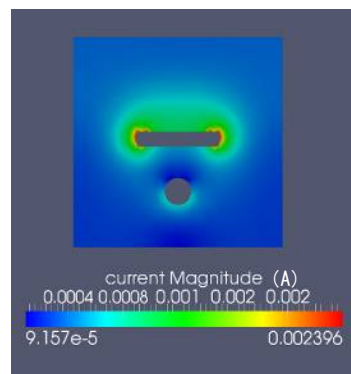
4. 6. 2 数値解析の結果

(1) 犠牲陽極材付近の電位・電流密度分布

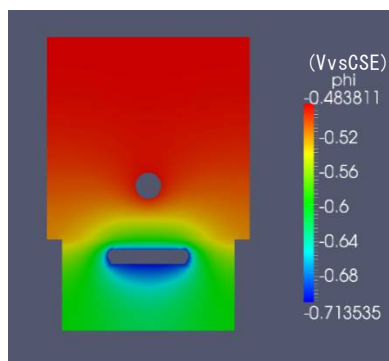
図 4. 6. 1 において黄色の破線で示される、供試体長手方向と直角方向で犠牲陽極材の中心を通る線で輪切りした面における犠牲陽極材内部設置供試体と外部設置供試体の電位および電流密度分布の解析結果のうち、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 の結果を図 4. 6. 5 に示す。なお、電位は全て照合電極を飽和硫酸銅電極 (CSE) に換算したものである。



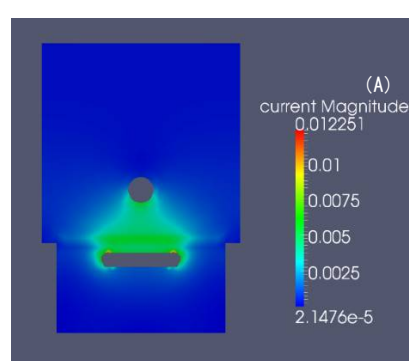
(a) 内部設置供試体の電位分布



(b) 内部設置供試体の電流密度分布



(c) 外部設置供試体の電位分布



(d) 外部設置供試体の電流密度分布

図 4. 6. 1 犠牲陽極材付近の電位および電流密度分布の解析結果 (塩化物イオン: 10kg/m^3)

犠牲陽極材付近の電位は内部設置供試体および外部設置供試体ともに、 $-0.7\sim-0.8\text{VvsCSE}$ ($-800\sim-700\text{mVvsCSE}$)程度の電位を示し、最も低い電位を示している。犠牲陽極材から離れると電位は高くなるが、その分布形状はほぼ線対称である。

また、電流密度分布は、内部設置供試体および外部設置供試体ともに、犠牲陽極材および鉄筋表面で高い電流密度分布が見られる。犠牲陽極材表面では、端部の電流密度が高い傾向を示している。また、鉄筋表面でも下面側の電流密度が高い傾向を示しており、電流密度は犠牲陽極材表面や鉄筋表面で分布を持って存在することが示唆された。また、電流密度分布の形状についても電位分布と同じく概ね線対称であった。

したがって、以降の供試体全体の電位及び電流密度分布については供試体中心部の断面である図 4.6.1 で示した 2 次元メッシュ図で示すこととした。

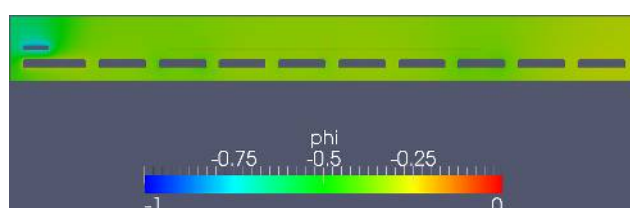
(2) 供試体全体の電位分布

犠牲陽極材を断面修復材内部に設置した内部設置供試体の電位分布の解析結果を図 4.6.5 に、犠牲陽極材を鉄筋 No.2 の外部に設置した外部設置供試体の電位分布の解析結果を図 4.6.6 に示す。

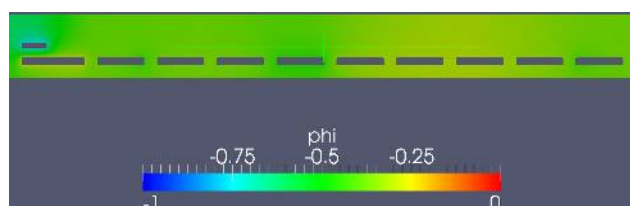
内部設置供試体の電位分布解析結果より、躯体コンクリート中の塩化物イオン量 2kg/m^3 の供試体では、打継界面近傍の鉄筋の電位が低く、界面から遠ざかるにつれて徐々に電位が高くなっていることがわかる。おおむね打継界面から躯体コンクリート側に 7 本目までの鉄筋の電位が卑側にシフトしているものと考えられる。また、同一の分割鉄筋表面においても、鉄筋電位は一樣ではなく、分布を持つことが示唆された。

塩化物イオン量 5kg/m^3 では、打継界面から躯体コンクリート側に 4 本目までの鉄筋の電位が卑側にシフトしている様子がうかがえる。

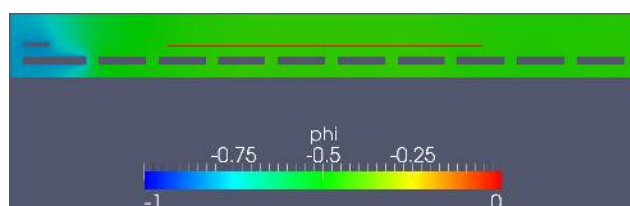
塩化物イオン量 10kg/m^3 の解析結果からは、打継界面から躯体コンクリート側に 2 本目までの鉄筋の電位が卑側にシフトしていることがうかがえ、躯体コンクリート中の塩化物イオン量の違いにより、分極が及ぶ範囲が小さくなることが再現できているものと考えられる。



(Cl⁻ : 2kg/m^3)



(Cl⁻ : 5kg/m^3)



(Cl⁻ : 10kg/m^3)

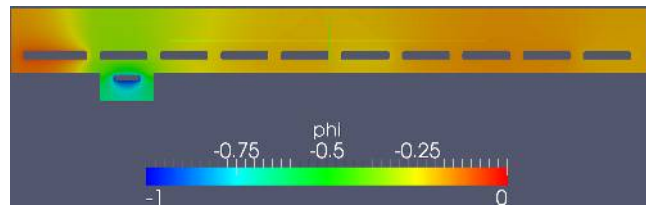
図 4.6.5 電位分布解析結果（内部設置供試体）

外部設置供試体の電位分布解析結果より、全ての塩化物イオン量の解析結果からも犠牲陽極材近傍の鉄筋 No.2 の電位が他の鉄筋に比べて卑側の電位となっており、自然電位からの分極が大きくなっていることがうかがえ、犠牲陽極材を外部に設置している効果が再現できているものと考えられる。

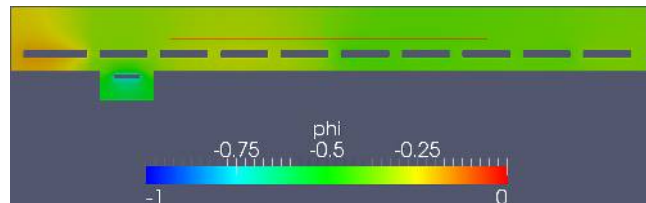
(2) 鉄筋表面の電位分布の実測値との比較

犠牲陽極材を断面修復材内部に設置した内部設置供試体の鉄筋表面位置における電位分布の解析結果を図 4.6.7 に、犠牲陽極材を鉄筋 No.2 の外部に設置した外部設置供試体の電位分布の解析結果を図 4.6.8 に示す。図中の横軸は供試体の端からの距離を示す。

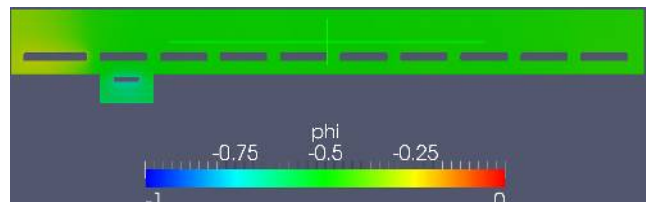
犠牲陽極材を断面修復材内部に設置する内部設置供試体の電位分布の解析結果より、電位の解析結果と実測値は、躯体コンクリート部の鉄筋については、おおむね一致する。しかし、断面修復材部の鉄筋の電位はあまり一致していない。これは、分極曲線の測定精度に起因するものと考えられ、青木ら²¹⁾の研究では、分極曲線は動電位法よりも定電流法で測定した方が精度の高い解析が可能であるとしている。本研究では、動電位法で分極曲線を測定しており、今後の検討課題としたい。また、同一の分割鉄筋表面においても、鉄筋電位は一樣ではなく、分布を持つことが示唆された。



(Cl⁻ : 2kg/m³)



(Cl⁻ : 5kg/m³)



(Cl⁻ : 10kg/m³)

図 4.6.6 電位分布解析結果（外部設置供試体）

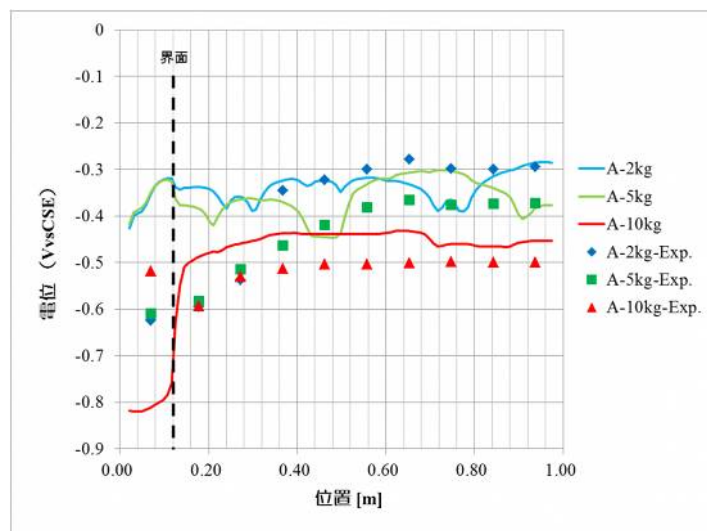


図 4.6.7 犠牲陽極材を断面修復材内部に設置した内部設置供試体の電位分布解析結果

犠牲陽極材を外部に設置する外部設置供試体の電位分布の解析結果より、電位の解析結果と実測値は、塩化物イオン量 5kg/m^3 と 10kg/m^3 のものについてはおおむね一致するが、塩化物イオン量 2kg/m^3 の解析結果については界面付近の鉄筋の電位が実測値よりも貴側の値を示す結果となった。しかし、塩化物イオン量 2kg/m^3 の解析結果の電位分布は、鉄筋 No.2 付近の電位が大きく卑側となり、界面から離れるにつれて電位が貴側になる分布形状が実測値とよく一致している。全体としては、おおむね犠牲陽極材を外部に取り付けた特徴をよく示しているものと考えられる。

(3) 電流密度分布

犠牲陽極材を断面修復材内部に設置した内部設置供試体の電流密度分布の解析結果を図 4.6.9 に、犠牲陽極材を鉄筋 No.2 の外部に設置した外部設置供試体の電流密度分布の解析結果を図 4.6.10 に示す。

内部設置供試体の電流密度分布解析結果より、犠牲陽極材近傍の断面修復材内部の鉄筋 No.1 に高い電流密度が認められる。犠牲陽極材から離れるにしたがっておおむね電流密度は小さくなる傾向にある。ただし、周囲の鉄筋よりも電位の低いマクロアノードになる分割鉄筋（特に塩化物イオン量 5kg/m^3 の鉄筋 No.5）においては周囲の鉄筋よりも電流密度が高くなるものもみられた。

外部設置供試体の電流密度分布解析結果より、犠牲陽極材を設置している近傍の鉄筋 No.2 に流れる電流密度が高いことを示しており、犠牲陽極材の外部設置による特徴が解析結果からもうかがえる結果となった。

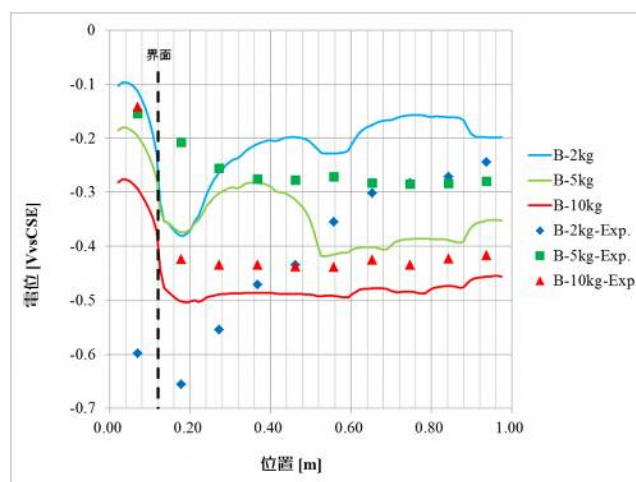
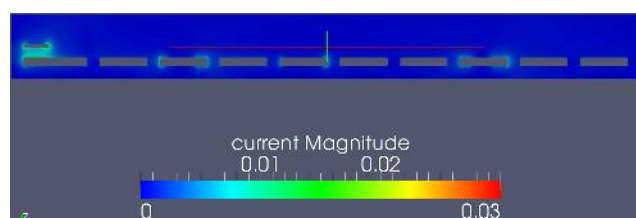
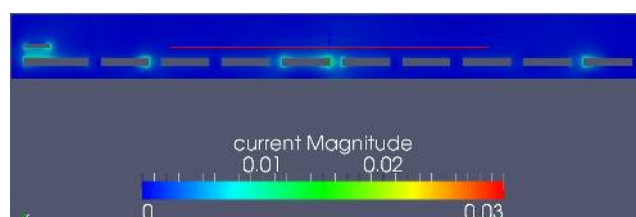


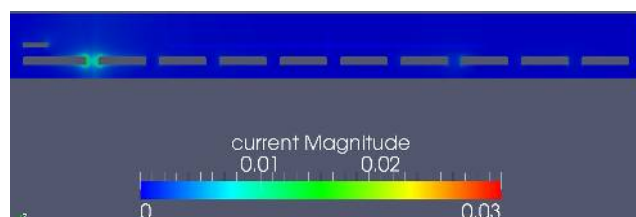
図 4.6.8 犠牲陽極材を外部に設置した外部設置供試体の電位分布解析結果



(Cl⁻ : 2kg/m^3)

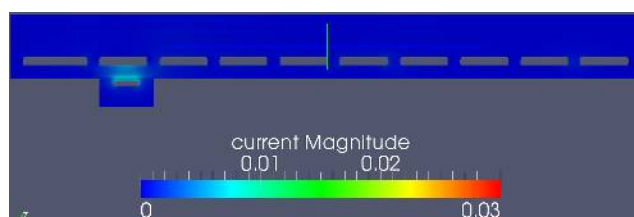


(Cl⁻ : 5kg/m^3)



(Cl⁻ : 10kg/m^3)

図 4.6.9 電流密度分布解析結果(内部設置供試体)



(Cl⁻ : 2kg/m^3)

図 4.6.10-1 電流密度分布解析結果(外部設置供試体)

（４）鉄筋表面の電流分布の実測値との比較

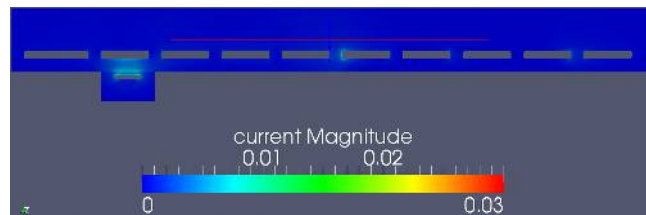
解析結果から求められた、内部設置供試体および外部設置供試体の各分割鉄筋の表面位置における電流密度分布と、4.2節で測定された実測値を比較したものを図4.6.11および図4.6.12に示す。

内部設置供試体について、電流密度の解析結果は躯体コンクリート内部の分割鉄筋 No.4 付近から一致してくるものの、全体としては実測値よりも小さい傾向であった。電流密度の分布も外部設置供試体について、電流密度の値そのものは、実測値よりも解析値の方が小さい傾向にあった。電流密度分布については、犠牲陽極材を設置している鉄筋 No.2 付近（位置 0.2m）の電流密度が際立って大きくなっており、この点は実測値とも一致する。分布の形状は一致するが、電流密度が小さくなるということは、設定したコンクリートの比抵抗が高いことが考えられる。このことから、電流密度の解析結果の精度は電位の解析で述べたように、分極曲線の測定精度に加え、コンクリートと断面修復材の比抵抗の測定精度も影響を受けると考えられ、今後の課題として検討したい。

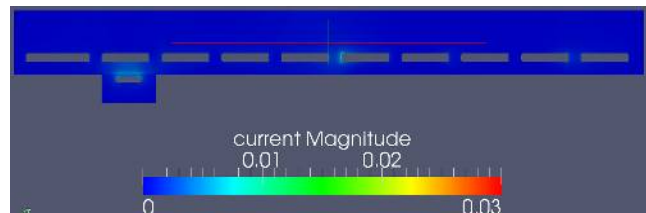
以上のことから、今回検討した数値解析による犠牲陽極材を設置した場合の鉄筋コンクリート内の電位および電流分布についてのシミュレーションはおおむね有効であると考えられる。

4.6.3 犠牲陽極材が消耗した場合の電位・電流密度の解析

前節で検討した犠牲陽極材を設置した供試体について、犠牲陽極材の犠牲陽極が消耗した場合を模擬した解析を検討する。



(Cl⁻ : 5kg/m³)



(Cl⁻ : 10kg/m³)

図 4.6.10-2 電流密度分布解析結果（外部設置供試体）

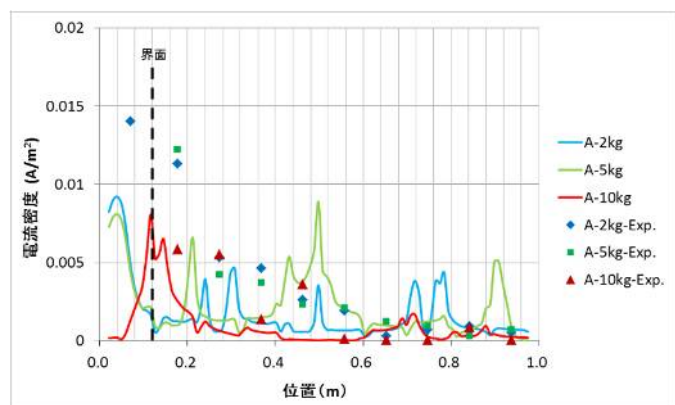


図 4.6.11 鉄筋表面の電流密度分布と実測値の比較（内部設置供試体）

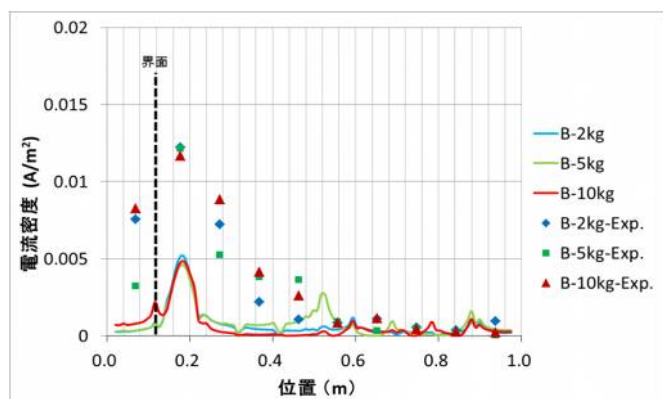


図 4.6.12 鉄筋表面の電流密度分布と実測値の比較（外部設置供試体）

犠牲陽極材の消耗を模擬し、犠牲陽極材がアノードとなるように直流の外部電源につなぎ、強制的に 10mA の電流を 2 か月間通電した。この間の積算通電量は 52500 クーロンとなり、2 章で示した本研究で検討している犠牲陽極材の総有効電荷 150000 クーロンの約 1/3 に相当する。通電後、アノード分極曲線を測定したものを図 4.6.13 に示す。図より、自然電位が貴側に大きく移行していることが認められる。これは、犠牲陽極の金属表面に酸化物による被膜が形成されたためと考えられる。

次に、図 4.6.13 で示された消耗した犠牲陽極材の分極曲線を用いて、犠牲陽極材を断面修復材内部に設置した内部設置供試体及びコンクリート躯体表面の外部に設置した外部設置供試体の電位分布について数値解析を行った。解析の結果を図 4.6.14 および図 4.6.15 に示す。

犠牲陽極材を内部に設置した内部設置供試体において、犠牲陽極材が消耗した場合の電位分布は、犠牲陽極材を設置した位置付近の電位が 0.05V 程度貴側にシフトするが、躯体コンクリート中の鉄筋は大きくは変化しない結果となった。一方、犠牲陽極材を外部に設置した外部設置供試体において、犠牲陽極材を設置した位置の鉄筋電位は 0.02~0.1V 程度貴側にシフトしており、内部設置供試体よりも貴側へのシフト量が大きくなった。特に外部設置供試体の塩化物イオン量が 2kg/m³ のものについては、電位の貴側へのシフト量が大きくなった。

次に、同様に消耗した犠牲陽極材を用いた場合の電流密度分布について検討を行った。解析結果を図 4.6.16 および図 4.6.17 に示す。

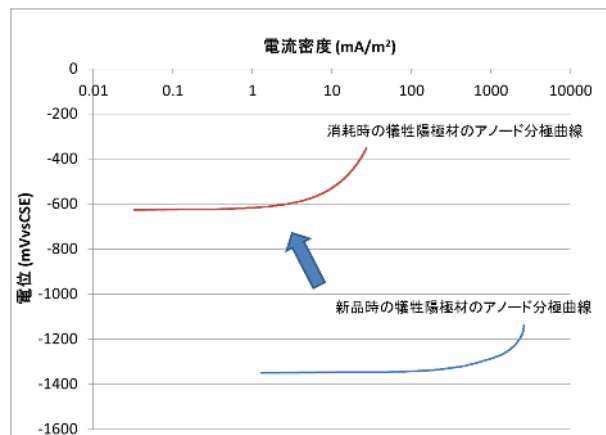


図 4.6.13 消耗を模擬した犠牲陽極材の分極曲線

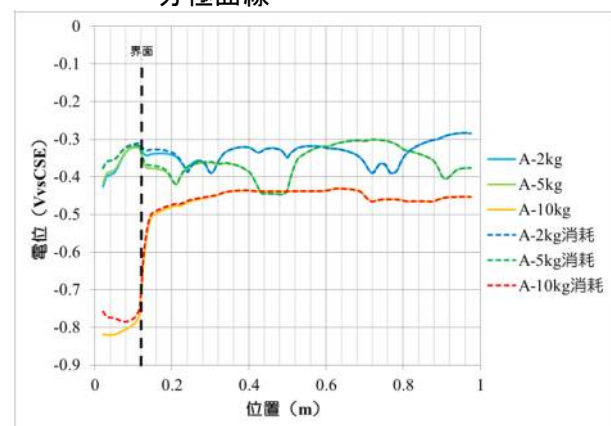


図 4.6.14 犠牲陽極材が消耗した場合の電位分布（内部設置供試体）

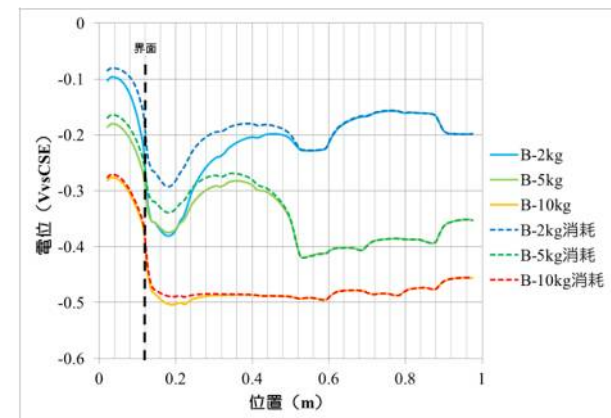


図 4.6.15 犠牲陽極材が消耗した場合の電位分布（外部設置供試体）

犠牲陽極材が消耗した場合の電流密度について、消耗した犠牲陽極材を用いたものは、おおむね電流密度は小さくなる傾向にある。特に外部設置供試体については、界面付近コンクリート側の位置 0.2m 付近の電流密度が小さくなることが明瞭に認められる。また、内部設置供試体についても断面修復材部となる位置 0.04m 付近の電流密度が小さくなることが認められ、犠牲陽極材を設置した位置に近い鉄筋の電流密度は、犠牲陽極材の消耗の影響を特に大きく受けるようである。

4.6.4 犠牲陽極材を用いた防食工法の耐久性

(1) 犠牲陽極材のもつ総電荷から算出した耐久性

犠牲陽極材を用いた防食工法の耐久性についてケーススタディを実施した。犠牲陽極材の鉄筋防食効果は、犠牲陽極材から防食電流を出力して得られる。本項では、犠牲陽極材中の犠牲陽極金属がもつ総電荷をもとに、犠牲陽極材から出力された電流から、犠牲陽極材の耐用年数を算出するように試みた。

2章で紹介した既往の研究より、本研究で用いている犠牲陽極材の総有効電荷は、150450 クーロンであることが示されている²²⁾。また、犠牲陽極材から出力される電流量について、試験開始から6か月時点での値を内部設置供試体および外部設置供試体の躯体コンクリートの各塩化物イオン量の条件別に表4.6.2に示す。

表 4.6.2 犠牲陽極材から出力される電流量 (単位:mA)

供試体種類	躯体コンクリート中の塩化物イオン量		
	2 kg/m ³	5 kg/m ³	10 kg/m ³
内部設置供試体	0.129	0.117	0.138
外部設置供試体	0.101	0.125	0.130

各試験条件において、試験開始から6か月以降も表4.6.2に示した電流量を出力すると仮定した場合の、経過年数と犠牲陽極材の積算出力電荷の関係を図4.6.18に示す。

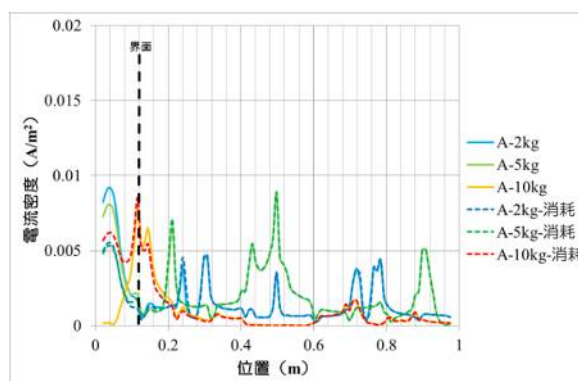


図 4.6.16 犠牲陽極材が消耗した場合の電流密度分布 (内部設置供試体)

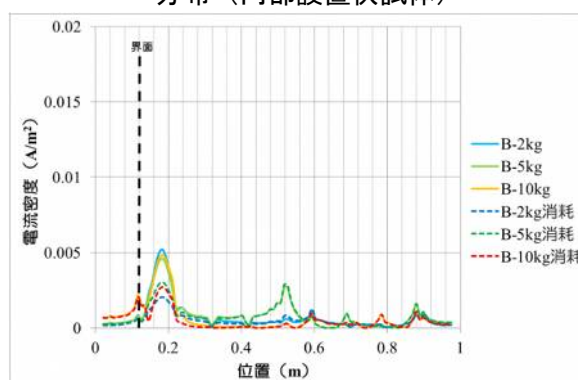


図 4.6.17 犠牲陽極材が消耗した場合の電流密度分布 (外部設置供試体)

経過年数と犠牲陽極材の積算出力電荷の関係から、犠牲陽極材の総有効電荷 150450 クーロンに到達する年数を耐用年数として、表 4.6.3 のように整理される。

犠牲陽極材の総有効電荷をもとに犠牲陽極材の耐用年数を算出すると、各試験条件において 30～40 年前後の耐用年数となった。

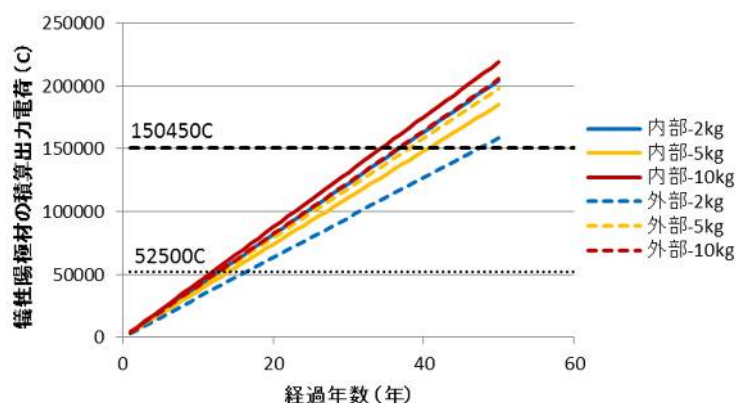


図 4.6.18 各条件における経過年数と犠牲陽極材の積算出力電荷の関係

表 4.6.3 犠牲陽極材の総有効電荷から算出した耐用年数

供試体種類	躯体コンクリート中の塩化物イオン量		
	2 kg/m ³	5 kg/m ³	10 kg/m ³
内部設置供試体	36 年	40 年	34 年
外部設置供試体	47 年	38 年	36 年

（２）電流の解析結果から算出した耐久性

犠牲陽極材の消耗を模擬した場合の電流の解析結果である図 4.6.16～17 から、犠牲陽極材が消耗すると鉄筋に流れる電流密度は低下することがわかった。したがって、犠牲陽極材が消耗すると、鉄筋に流れる防食電流密度も低下することが考えられる。ここで、犠牲陽極材の当初および消耗時における、断面修復材と躯体コンクリートの界面から躯体コンクリート側に 30cm の範囲の鉄筋表面の電流密度の平均値の関係を図 4.6.19 に示す。なお、躯体コンクリート側に 30cm の範囲としたのは、4.5 節で検討した図 4.5.7 より解析対象とする電流密度を基準とした場合の犠牲陽極材の防食効果がおよぶ範囲としておおむね中程度の防食効果が期待できると考えたからである。

ここで、図 4.6.19 における各条件の犠牲陽極材消耗時の電流密度は、52500 クーロンの電荷を出力した犠牲陽極材の状態をもとに解析した結果である。したがって、

まず図 4.6.18 から各条件において犠牲陽極材から積算出力電荷で 52500 クーロンが出力される

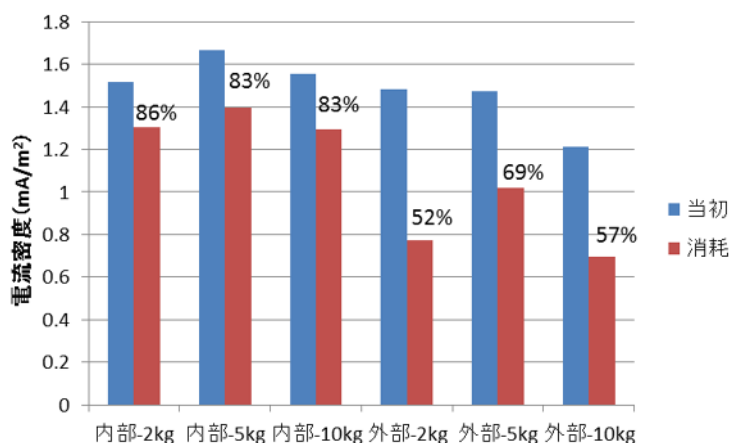


図 4.6.19 数値解析による犠牲陽極材の消耗の有無による躯体コンクリート側 30cm 範囲の鉄筋表面の平均電流密度および消耗時の維持率

期間を求めた（おおよそ 12～15 年程度）。次に、図 4.6.19 に示した犠牲陽極材消耗時の電流密度の維持率は、52500 クーロンの電荷を犠牲陽極材が出力した時点における電流密度の維持率であると考え、その後も同じ割合で電流密度が低下すると仮定した。次に、各試験条件において当初に流れる電流密度は、表 4.6.3 に示した実測値から算出した電流密度が流れると仮定した。

表 4.6.3 躯体コンクリート側 30cm 範囲の鉄筋表面の平均電流密度（単位：mA/m²）

供試体種類	躯体コンクリート中の塩化物イオン量		
	2 kg/m ³	5 kg/m ³	10 kg/m ³
内部設置供試体	6.37	4.77	3.03
外部設置供試体	7.20	7.06	9.59

以上の仮定をもとに算出した経過年数と界面から躯体コンクリート側に 30cm の範囲の鉄筋表面の電流密度の関係を図 4.6.20 に示す。

ここで、4.5 節で鉄筋防食率が 20%以上の基準値とした防食電流密度 1.0mA/m²を下回るまでの期間を耐用年数とする。したがって、経過年数と鉄筋表面の電流密度の関係から、耐用年数は表 4.6.4 のように整理される。

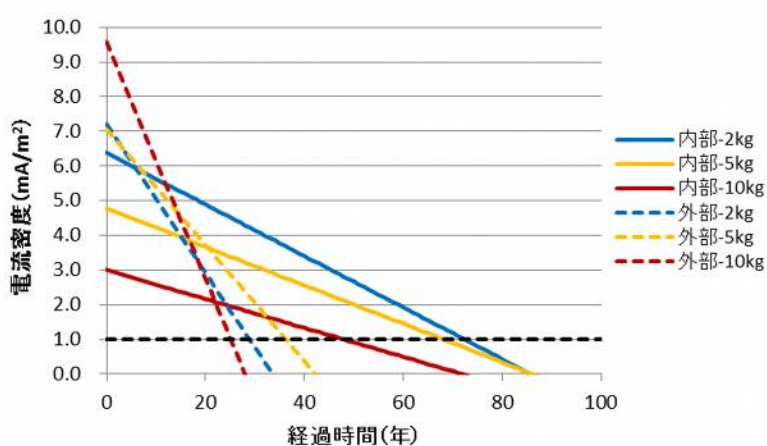


図 4.6.20 各条件における経過年数と鉄筋表面における電流密度の関係

表 4.6.4 電流密度の解析から算出した耐用年数

供試体種類	躯体コンクリート中の塩化物イオン量		
	2 kg/m ³	5 kg/m ³	10 kg/m ³
内部設置供試体	72 年	68 年	47 年
外部設置供試体	29 年	37 年	26 年

犠牲陽極材の消耗を考慮した電流密度の解析結果をもとに犠牲陽極材の耐用年数を算出すると、各試験条件において 20～70 年前後の耐用年数となった。

前項で検討した内容とあわせて 2 つの耐用年数の算出検討より、より短い期間を各試験条件における犠牲陽極材の耐用年数として、各試験条件における犠牲陽極材の耐用年数は表 4.6.5 のように整理される。

表 4.6.5 各試験条件における犠牲陽極材の耐用年数

供試体種類	躯体コンクリート中の塩化物イオン量		
	2 kg/m ³	5 kg/m ³	10 kg/m ³
内部設置供試体	36 年	40 年	34 年
外部設置供試体	29 年	37 年	26 年

(3) ライフサイクルコストの算出

前項までに検討した犠牲陽極材の防食工法を適用するにあたって、ライフサイクルコストを算出した。想定する構造物は、3.4 節で検討したのと同じ条件とし、100 年後のライフサイクルコストが最も小さかった、断面修復深さ 36mm でポリマーセメントモルタルは CA₂ をセメント量の 5% 混和したものを用いることとした。

犠牲陽極材は、内部設置型および外部設置型ともに躯体コンクリートの塩化物イオン量は、耐用年数が最も短い 10kg/m³ を用いることとした。犠牲陽極材の交換のサイクルとしては、表 4.6.5 に示すように犠牲陽極材の耐用年数を迎える年に交換を行うこととした。また、想定したはつり作業と犠牲陽極材の交換作業の単価を表 4.6.6 に示す。供用年数は 100 年とし、割引率および定期点検費用は考慮しなかった。ライフサイクルコストの算出結果を図 4.6.21 に示す。

表 4.6.6 各ケースにおける施工単価（単位：円/m²）

設置位置	取換え単価	備考
内部設置	104,820	断面修復材のはつり取り＋断面修復工 ＋犠牲陽極材取換え
外部設置	35,000	犠牲陽極材の取替えのみ

断面修復工法に犠牲陽極材を設置する防食工法のライフサイクルコストの試算結果から、50 年程度以上の長い供用期間を設定する場合は、犠牲陽極材を外部設置とする方がコストは小さくなる。これは犠牲陽極材を断面修復材の内部に設置する場合、犠牲陽極材の交換する場合は断面修復材をはつり取る必要があり、コストがかかるためである。なお、供用期間が 30 年程度であれば、犠牲陽極材を内部設置とすれば、犠牲陽極材の交換は不要となるので、外部設置よりもコストは小さくなる。

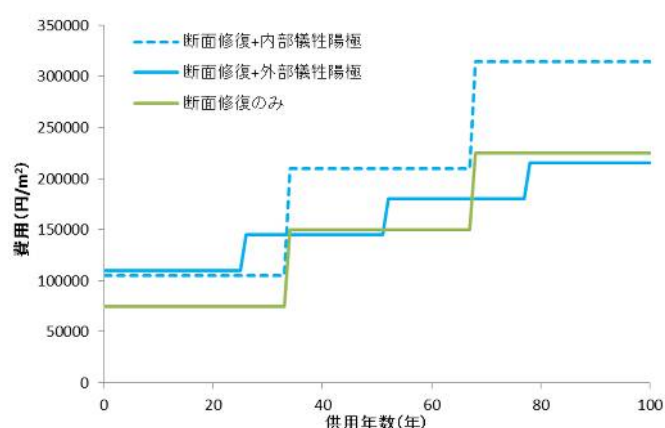


図 4.6.21 各ケースにおけるライフサイクルコスト試算結果

以上のことから、断面修復工法に犠牲陽極材を設置する防食工法において、想定する供用年数によりもっともライフサイクルコストが小さくなる条件は異なることがわかった。したがって、

ライフサイクルコストが小さくなる効果的な工法選定のためには、事前に想定する供用年数の設定が重要となる。

4.6.5 本節のまとめ

犠牲陽極材を設置した躯体コンクリート強度 21N/mm^2 のシリーズについて、犠牲陽極材の防食効果について、測定した分極曲線をもとに供試体内部の電位と電流について数値解析の検討を行った。

- (1) 電位分布は、躯体コンクリート中の塩化物イオン量が増加するにしたがって、犠牲陽極材による鉄筋の分極が影響を及ぼす範囲が小さくなるなどの現象をとらえる解析結果となり、おおむね傾向は一致する。
- (2) 鉄筋表面上の電流密度分布については、躯体コンクリート内部の鉄筋についてはおおむね実測値と一致する。しかし、補修材部の鉄筋については、実測値とかい離する部分も認められた。解析精度を高めるため、測定方法の検討を含めたより精度の高い分極曲線の測定が求められる。
- (3) 犠牲陽極材の総有効電荷の $1/3$ 程度消耗した状態を模擬した犠牲陽極材を用いて、犠牲陽極工法の電位分布を解析した結果、消耗状態では、電位は貴側にシフトし、電流密度は低下した。犠牲陽極材が消耗すると特に電流密度に大きく影響することが示唆された。
- (4) 犠牲陽極材を用いた防食工法のライフサイクルコストを試算した結果、想定する供用年数により、最適な犠牲陽極材の設置条件が異なることがわかった。長期の耐久性を想定する場合、犠牲陽極材は外部設置とした方がライフサイクルコストを抑えることができる。

4.7 本章のまとめ

塩害劣化を受けたコンクリート構造物の断面修復工法に犠牲陽極材を設置した防食工法について、躯体コンクリートの塩化物イオン量や、犠牲陽極材の設置位置および断面修復材の種類によって、犠牲陽極材の鉄筋防食効果がどのような影響を受けるか実験的に検討を行った。また、犠牲陽極材の鉄筋防食性能について、評価手法と鉄筋防食性能の判定基準についての検討も試みた。さらに、犠牲陽極材の防食効果について数値解析的な検討を行い、犠牲陽極材を用いた防食工法のライフサイクルコストを試算した。その主な結果は以下のとおりである。

- (1) 犠牲陽極材は内部設置よりも外部設置の方が断面修復部直近の鉄筋のマクロセル腐食の抑制効果が高いと考えられる。
- (2) 躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 かつ環境条件が $35^\circ\text{C}90\%\text{R.H.}$ の厳しい塩害劣化条件では、犠牲陽極材は内部設置よりも外部設置の方が防食範囲は広く、防食効果が高いと考えられる。
- (3) 環境条件が 20°C で、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg 、 5kg および 10kg/m^3 の条件では、犠牲陽極材は内部設置および外部設置とも鉄筋防食効果が認められ、その効果は同等程度であった。

- (4) 塩素固定化材を混和したポリマーセメントモルタルを断面修復材に用いると、特に断面修復材内部の鉄筋の防食効果が高くなる。
- (5) 犠牲陽極材の外部設置箇所には有機-無機複合型被膜養生材を塗布したものは、保湿効果が高まり、特に界面付近の鉄筋の防食効果が高くなる。
- (5) 防食電流量が減少した犠牲陽極材中の亜鉛金属表面では酸化亜鉛が生成しており、反応活性が低下している可能性が示唆された。
- (6) 鉄筋の防食効果を鉄筋防食率で評価し、その評価指標として防食電流密度および復極量を検討した結果、各々鉄筋防食性能の評価指標として妥当な基準値をもつことが示唆された。
- (7) 今回検討した数値解析による犠牲陽極材を設置した場合の鉄筋コンクリート内の電位および電流分布についてのシミュレーションはおおむね有効であることがわかった。
- (8) 犠牲陽極材を用いた防食工法のライフサイクルコストを試算した結果、想定する供用年数により、最適な犠牲陽極材の設置条件が異なることがわかった。特に 50 年以上の長期耐久性を想定する場合、犠牲陽極材は外部設置とした方がライフサイクルコストを抑えることができる。

以上のことから、塩害劣化を受けたコンクリート構造物の断面修復工法に犠牲陽極材を設置した防食工法の犠牲陽極材の設置位置の違いによる鉄筋防食効果や防食効果を発揮する適用範囲について、一定の整理はできたものと考えている。

一方、今回の試験で残っている課題として、以下の点があげられる。

- (1) 長期的な試験期間における鉄筋防食性能の確認
- (2) 分極曲線および比抵抗の測定精度向上による数値解析の精度向上
- (3) 本研究で提案した鉄筋防食性能の評価指標の妥当性の確認

これらについては、さらに継続して実施中の供試体の試験により、引き続きデータを測定する。また、新たに試験を行うことでさらなる解明が必要と考えている。

【第 4 章 参考文献】

- 1) 出村克宣，大濱嘉彦，伊部博：補修後 5 年経過した鉄筋コンクリート建造物の鉄筋腐食，コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集，pp.29-32，1994.10
- 2) 長滝重義，大即信明，守分敦郎，宮里心一：鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究，土木学会論文集，No.544，V-32，pp.109-119，1996.8
- 3) 長滝重義，大即信明，守分敦郎，鎌田敏郎，宮里心一：断面修復部における打継目の物質通過性が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響，土木学会論文集，No.578，V-37，pp.31-42，1997.11
- 4) 宮里心一，大即信明：既存鉄筋コンクリート中のマクロセル腐食速度の推定，コンクリート工学年次論文集，vol.12，No.2，pp.93-103，2001.05
- 5) 飯島亨，工藤輝大，玉井譲：コンクリート構造物の部分断面補修箇所周辺における鉄筋腐食機構と劣化対策，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム，第 10 巻，pp.311-316，2010.8
- 6) 平石剛紀，新井惇一，坂田昇，須田久美子：犠牲陽極材のマクロセル腐食抑制効果に関する

- 実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.1431-1436, 2002
- 7) 松久保博敬, 真下昌章, 芦田公伸, 審良善和, 濱田秀則: 海洋環境下における犠牲陽極材料の腐食抑制効果, コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム, pp.357-362, 2004
- 8) 山口晃史, 宮里心一, 山本賢司: 断面修復材料の電気抵抗が犠牲陽極材の防食性能に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, 第 9 巻, pp.315-322, 2009
- 9) 腐食防食協会編: 材料環境学入門, p.19, 丸善, 1993
- 10) G.Sergi, : TEN YEAR RESULTS OF GALVANIC SACRIFICIAL ANODES IN STEEL REINFORCED CONCRETE, EUROCORR 2009, N SS 15-O-8405, 2009
- 11) 宮里心一, 大即信明, 小長井彰祐: 分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.547-552, 2001
- 12) 横田優: 建設後 36 年経過した RC 造開水路側壁の腐食モニタリング結果について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.185-190, 1998
- 13) 宮里心一, 大即信明, 佐伯竜彦: 分極曲線を用いた断面修復部のマクロセル腐食速度予測, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.865-870, 1998
- 14) 碓本大, 荒木弘祐, 服部篤史, 宮川豊章: 両引き試験による鉄筋腐食と付着強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.661-666, 2006
- 15) 日本コンクリート工学協会編: コンクリート診断技術 02 [基礎編] 4.8 鉄筋腐食, p.167, 日本コンクリート工学協会, 2002
- 16) 板垣昌幸, 山田祥延, 渡辺邦洋, 額賀孝訓, 梅村文夫: 炭素鋼のアノード分極曲線に対する重炭酸イオン及びシリカの影響, 材料と環境, 第 53 巻, pp.434-439, 2004
- 17) 丸屋剛, 武田均, 堀口賢一, 小山哲, 許鎧麒: コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食に関する解析手法の構築, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.757-776, 2006
- 18) 横田優: 電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.545-550, 1990
- 19) 清水鉄兵, 武若耕司, 山口明伸, 入江隼輝: 金属溶射を応用した流電陽極方式電気防食工法の防食効果とその評価手法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1381-1386, 2009
- 20) 盛岡実, 佐々木崇, 荒木昭俊, 木田勉: 有機・無機複合塗膜養生剤の乾燥収縮低減効果と基礎物性, セメント・コンクリート論文集, No. 60, pp. 342-347, 2006
- 21) 青木繁, 岸本喜久雄, 宮坂松甫: ガルバニック腐食およびカソード防食における電位・電流密度分布予測, 材料, Vol.37, No.418, 1988
- 22) G.Sergi, D.Whitmore: Performance of zinc sacrificial anodes for long-term control of reinforcement corrosion, NACE Corrosion2010 Conference & Expo, Paper No.10122, 2010

第5章 結論

5.1 本研究で得られた結論

本研究では、我が国におけるコンクリート構造物の主要な劣化要因の一つである塩害を受けたコンクリート構造物をとりあげ、その対策について検討を行った。具体的対策としては、塩害を受けたコンクリート構造物の対策として一般的な対策のひとつである、断面修復工法を検討の対象とし、その耐久性をより高める方法について検討を行い、効果的かつ経済的な断面修復工法の仕様を提案することを本研究の目的として検討を行った。

以下に各章における結論を総括する。

「第1章 序論」では、本研究の背景や目的を示し、各章における検討内容や構成を示した。

「第2章 既往の研究」では、断面修復工法に用いるポリマーセメントモルタルに対する要求性能、塩害に対するコンクリート混和材からのアプローチの変遷や最新の技術、電気化学的補修工法の原理や犠牲陽極材に関する研究についてレビューを行い、本研究における課題を整理した。

「第3章 カルシウムアルミネートを主成分とする塩素固定化材を用いた断面修復材」では、まず、カルシウムアルミネート（CA₂）について混和するセメント種類や微粒分をカットする粒度分布を制御することにより、塩素固定化能力等にどのような影響があるか実験的に検討を行い、以下の結論を得た。

- ①塩素固定化材の主成分である CA₂ は、普通、早強、低熱のいずれのポルトランドセメントでも塩素固定化能力を発揮する。
- ②CA₂ の微粒分をカットする粒度分布を制御することで、フローダウンと乾燥収縮をある程度抑制することが分かった。また、粒度分布を制御したものでも塩素固定化能力はほとんど変わらない。

次にカルシウムアルミネート（CA₂）を主成分とする塩素固定化材を用いた断面修復材について、実験的検討を行い以下の結論を得た。

- ①塩素固定化材を混和したポリマーセメントモルタルは、塩素固定化材を混和しないものに比べて塩化物イオン固定化能力、塩化物イオン浸透抑制及び中性化抑制能力を有し、その適正な混和率は、セメントに対して 5%以上である。
- ②塩素固定化材を混和したポリマーセメントモルタルは、塩素固定化材を混和しないものに比べて圧縮強度は若干低下するが、曲げ強度や付着強度には大きな影響を与えない。一方、乾燥収縮率は若干大きくなる。

次に塩素固定化材を混和したモルタルと塩化物イオンを多量に含んだコンクリートとを打ち継

いだ場合の打継界面付近の鉄筋腐食及び塩化物イオン移動挙動について検討を行い、以下の結論を得た。

- ①塩素固定化材を混和したモルタルと塩化物イオンを混和したコンクリートを打ち継いだ場合、塩化物イオンを含むコンクリート側の鉄筋の腐食を抑制する効果があることが示唆された。
- ②塩素固定化材を混和しないモルタルと塩化物イオンを混和したコンクリートを打ち継いだ場合、打継ぎ界面付近の塩化物イオンは、濃度勾配による拡散により、コンクリートからモルタル側に塩化物イオンが移動した。
- ③塩素固定化材を混和したモルタルと塩化物イオンを混和したコンクリートを打ち継いだ場合、打継界面付近の可溶性塩化物イオンは、コンクリートからモルタル側に塩素固定化材を混和しないモルタルを打ち継いだ場合よりも多く移動し、結果として打継界面付近のコンクリート側の可溶性塩化物イオンは大きく減少した。また、打継界面付近のモルタル側の固定化塩化物イオンが卓越して増加した。これは、塩素固定化材の成分である CA_2 から生成したハイドロカルマイト (HC) が可溶性塩化物イオンを多く固定化し、モルタル側の可溶性塩化物イオンが減少した結果、より多くの可溶性塩化物イオンがコンクリート側から移動したためと考察した。
- ④塩素固定化材を用いたコンクリートの塩化物イオンの拡散挙動は、可溶性塩化物イオンが *Fick* の法則による拡散に従い、塩化物イオンの固定化の割合および固定化の上限値を導入することで数値解析的に再現することが可能であることがわかった。
- ⑤上記解析モデルを用いて、断面修復工法を実施する場合のライフサイクルコストを試算した結果、想定する供用年数により最適な断面修復深さがあることがわかった。また、長期の耐久性を考慮する場合、断面修復材に塩素固定化材を混和することで、断面修復工法におけるライフサイクルコストを小さく抑えることができることがわかった。

「第4章 犠牲陽極材を併用した断面修復工法における鉄筋防食性能」では、塩害を受けたコンクリート構造物の断面修復工法を模擬した鉄筋コンクリート供試体を作製し、断面修復工法と併用する犠牲陽極材の鉄筋腐食抑制性能について、躯体コンクリート強度、躯体コンクリート中の塩化物イオン量、暴露環境温度、犠牲陽極材の設置位置等によりどのような影響を受けるか実験的に検討し、以下の結論を得た。

(1) 躯体コンクリートの塩化物イオン量が 10kg/m^3 かつ 35°C 、90%R.H.の条件

躯体コンクリート強度および犠牲陽極材の設置方法が、犠牲陽極工法の鉄筋防食性能に与える影響について検討した。

- ①犠牲陽極材を断面修復材の内部に設置した供試体は、躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 の条件では、6 か月ほどで躯体コンクリート鉄筋すべてに腐食が発生し、厳しい腐食環境条件では防食効果の持続性に課題が残った。
- ②犠牲陽極材を打継界面付近の躯体コンクリートの外部に設置した供試体は、犠牲陽極材を内部設置した供試体で鉄筋腐食が確認された躯体コンクリート強度 21N/mm^2 の条件において

も、鉄筋防食効果を有することを確認した。

③躯体コンクリート強度が 40N/mm^2 の条件では、犠牲陽極材を断面修復材の内部に設置する供試体でも、犠牲陽極材を打継界面付近の躯体コンクリートの外部に設置する供試体でも、打継界面付近の鉄筋防食効果を有することを確認した。

④躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 および 40N/mm^2 のシリーズにおいて、犠牲陽極材を断面修復材の内部に設置する供試体よりも、犠牲陽極材を打継界面付近の躯体コンクリートの外部に設置する供試体の方が、躯体コンクリート中の鉄筋防食効果を発揮する範囲は広く、防食効果はより高いと考えられる。

⑤防食電流量が減少した犠牲陽極材の表面では、 Zn/O モル比が 1.0 に近い酸化亜鉛が生成しており、反応活性が低下している可能性が示唆された。

(2) 設置環境が 20°C 、40-60%R.H.で、躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 の条件

躯体コンクリート中の塩化物イオン量および犠牲陽極材の設置方法が、犠牲陽極工法の防食性能に与える影響について検討した。

①躯体コンクリートの塩化物イオン量が 2kg/m^3 の時は、試験期間が 6 か月において、犠牲陽極材を設置しない場合でも鉄筋はほとんど腐食しなかった。

②犠牲陽極材を断面修復材の内部に設置した供試体は、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 および 10kg/m^3 の場合において、打継界面付近の鉄筋防食効果が認められた。

③犠牲陽極材を打継界面付近の躯体コンクリートの外部に設置した供試体においても、躯体コンクリートの塩化物イオン量が 5kg/m^3 および 10kg/m^3 の場合において、打継界面付近の鉄筋防食効果が認められた。特に犠牲陽極材を設置した直下にある鉄筋防食効果は犠牲陽極材を内部に設置したものよりも高いことが認められた。

(3) 設置環境が 20°C 、40-60%R.H.で、躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 で塩化物イオン量が 10kg/m^3 の条件

断面修復材として、塩素固定化材を混和したポリマーセメントモルタルとした場合および、犠牲陽極材を打継界面付近の躯体コンクリートの外部に設置する供試体において、犠牲陽極材設置部に有機-無機複合型被膜養生材を塗布した場合の犠牲陽極工法の防食性能に与える影響について検討した。

①塩素固定化材を混和したポリマーセメントモルタルを断面修復材に用いると、特に断面修復材内部の鉄筋の防食効果が高くなることを確認した。

②犠牲陽極材を供試体外部に設置する供試体の犠牲陽極材設置部に、有機-無機複合型塗膜養生材を塗布したものは、特に界面付近の鉄筋の防食効果が高くなることを確認した。これは、有機-無機複合型被膜養生材を塗布すると、犠牲陽極材を設置しているモルタル内部の保湿効果が高まるため、犠牲陽極材の反応活性が高いレベルで維持されているためと考察した。

(4) 犠牲陽極材の鉄筋防食性能の評価手法についての検討

①復極量、防食電流密度、分極抵抗および鉄筋腐食電流密度を鉄筋防食性能の評価パラメータとして検討した結果、どのパラメータも評価項目として妥当な閾値をもつものであることを

確認した。

- ②鉄筋の防食効果を鉄筋防食率で評価し、その評価指標として防食電流密度および復極量を検討した結果、各々鉄筋防食率の評価指標として妥当な基準値をもつことが認められた。
- ③断面修復工法に犠牲陽極材を併用する防食工法は、暴露環境や躯体コンクリート中の塩化物イオン量にもよるが、断面修復界面から 200mm～800mm 程度の位置にある鉄筋にも「鉄筋防食抑制効果」を発揮する工法であることが確認された。

(5) 犠牲陽極材の防食効果の数値解析

- ①ラプラス方程式に基づく境界要素法を用いた数値解析による、犠牲陽極材を設置した場合の鉄筋コンクリート内の電位および電流分布についての数値解析は、おおむね有効であることがわかった。
- ②数値解析に基づき、犠牲陽極材を用いた防食工法のライフサイクルコストを試算した結果、想定する供用年数により、最適な犠牲陽極材の設置条件が異なることがわかった。特に 50 年以上の長期耐久性を想定する場合、犠牲陽極材は外部設置とした方がライフサイクルコストを抑えることができる。

5.2 塩害劣化を受けるコンクリート構造物の断面修復工法の選定に関するシナリオデザイン

3 章および 4 章において、塩害による劣化を受けるコンクリート構造物の断面修復工法に用いる材料およびそれに併用する犠牲陽極材を用いた場合の耐久性について実験的に検討してきた。これらの検討結果から、塩害を受けたコンクリート構造物の断面修復工法について、より長期の耐久性を確保するという観点から、以下のように提言を行う。

(1) 対象となる断面修復工法について

本節で対象とする断面修復工法は、塩害による劣化を受けたコンクリート構造物の断面修復工法に関するものとする。したがって、中性化やアルカリ骨材反応などの劣化要因による劣化を生じているものに関しては対象外とする。また、対象となる構造物の鉄筋比は本研究における供試体の鉄筋比 (1.3%) から鉄筋比は 1.5% のものまでを対象とする。

また、対象となる断面修復工法は、図 5.2.1 に示すように断面修復範囲から 300mm 程度の範囲において、躯体コンクリート中の鉄筋を防食すること想定するものとする。ここで、断面修復部の鉄筋防食は断面修復材の塩化物イオンの浸透抵抗性に依拠し、断面修復部の外側の鉄筋の防食性は犠牲陽極材による電気化学的防食性能に依拠するものとする。鉄筋防食を想定する範囲を断面修復部周囲の 300mm としたのは、4.6.4 (2) 節において、犠牲陽極材の防食性能の耐久性の解析検討で、軀

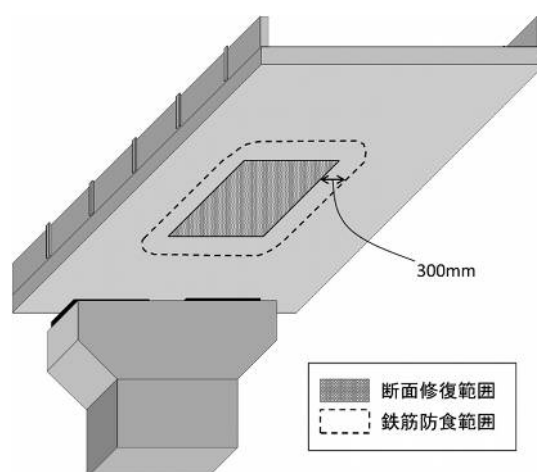


図 5.2.1 対象となる断面修復工法の断面修復範囲と鉄筋防食範囲の例

体コンクリート側に 300mm の範囲までの防食電流密度の減少率から耐久性を検討しているからである。なお、想定する鉄筋防食範囲を超えた範囲の鉄筋についても防食する必要がある場合は、本工法の適用性について更に検討を行い、適切に判断するものとする。

（２）対象となる躯体コンクリートについて

塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の躯体コンクリートの条件は多岐にわたる。この躯体コンクリートの条件を①躯体コンクリートの圧縮強度と②躯体コンクリートに含まれる塩化物イオンの２つの条件で整理する。

圧縮強度を指標として取り上げたのは、同じ塩化物イオン量が含まれるコンクリートでも、圧縮強度の違いにより内部の鉄筋の発錆状況は変化してくるためである。本研究では、圧縮強度の目標強度が 21N/mm^2 と 40N/mm^2 のコンクリートについて検討を行い、同じ塩化物イオン量でも 21N/mm^2 のコンクリートでは鉄筋が全面腐食してしまうが、 40N/mm^2 のコンクリートでは腐食は緩慢な状態に留まることを示し、犠牲陽極材の鉄筋防食効果も違ってくることを示した。

本節で対象となる躯体コンクリートの圧縮強度の上限値としては、本研究で取り上げた目標強度 40N/mm^2 のコンクリートの圧縮強度の実測値 46.9N/mm^2 から、その概数である 50N/mm^2 を上限値とした。また、 21N/mm^2 未満のコンクリートについては本研究においては試験を実施していないため、 21N/mm^2 を本節で対象となる躯体コンクリートの下限値とし、その範囲外のものについては、本工法の適用性について更に検討を行い、適切に判断するものとする。

躯体コンクリートに含まれる塩化物イオン量については、３章で述べたように、鉄筋の腐食反応には直接には可溶性塩化物イオンが関係すると考えられるが、現時点では可溶性塩化物イオン量を基準とする発錆限界値が明確になっていない。また、コンクリート中の鉄筋腐食が開始される物理化学的な条件は、腐食イオンである Cl^- と防食イオンである OH^- のモル数の比、すなわち $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ を用いるのが本質であるが、土木学会編「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」においては、照査の簡便性の観点から全塩化物イオン量で発錆限界の基準値を定めている。そのため、ここでは全塩化物イオン量で鉄筋の腐食環境を考えるものとする。

また、ここでの塩化物イオン量は鉄筋の腐食環境の指標とするものであるので、鉄筋のかぶり位置での全塩化物イオン量とする。実際の測定では、鉄筋のかぶり位置を含むコンクリート試験片に含まれる全塩化物イオン量の平均値となる。また、塩化物イオン量は予定供用期間中に想定される最大値を考慮するものとし、想定される暴露環境から土木学会編「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」に準拠して求めるものとする。

以上のように対象となる躯体コンクリートについて、事前に圧縮強度および塩化物イオン量の情報を得ることで、より詳細な工法の検討を行うことができると考えられる。

（３）対象となる環境について

塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物が設置される環境条件の検討も重要である。一般的には、海岸からの距離や融雪剤の散布の有無などの塩分の飛散状況を加味するが、さらに対象となるコンクリート構造物が受ける温度や湿度の環境についても検討を行うことも重要である。

本研究では、 20°C 、40-60%R.H.と 35°C 、90%R.H.の環境条件で試験を行い、同じコンクリー

ト強度, 同じ塩化物イオン量でも, 20℃, 40-60%R.H.の環境条件では緩慢な腐食であるが, 35℃, 90%R.H.の環境条件では, 鉄筋表面の pH が 酸性を示すほど厳しい腐食となることを示した. また, そのような厳しい腐食環境条件でも, 犠牲陽極材を外部設置とすることで鉄筋の防食性能を発揮することを示した.

また, 湿度条件については, 本研究では相対湿度 40%以下の条件での試験を実施していないので, 湿度が 40%以下の環境条件は検討の対象外とする. なお, 既往の研究¹⁾では相対湿度が 40%以下の低い場合は, 鉄筋腐食が停滞するとしている.

(4) 想定する耐用年数について

塩害を受けるコンクリート構造物を補修する場合, 補修後も塩化物イオンの飛来を想定することが多いと考えられる. したがって, 断面修復工の施工後もその後に受ける劣化を想定した対応が必要である.

長期間の耐用年数を想定する場合は, 断面修復材による断面修復だけではマクロセル腐食や塩化物イオンの再侵入や再拡散による再劣化の懸念も増大してくる. 断面修復工法において, 長期間の耐久性が必要な場合, 犠牲陽極材や塩害劣化の劣化因子の侵入を大幅に抑制する効果を併せ持つ塩素固定化材を混和した断面修復材などを用いることによって, 一般的な断面修復材による断面修復のみの場合よりも, 長期間の耐久性を発揮することができると考えられる.

本研究では, 塩化物イオン量を 2kg/m³, 5kg/m³, 10kg/m³ とした躯体コンクリートに犠牲陽極材を用いた場合の鉄筋の防食効果を詳細に検討し, 犠牲陽極材の効果とその効果が発揮できる範囲について示した. また, 塩素固定化材を混和した断面修復材が可溶性塩化物イオンを多く固定化することで, 断面修復時の躯体コンクリート側の全塩化物イオンおよび可溶性塩化物イオン量が減少し, 鉄筋腐食を抑制することも示した.

犠牲陽極材も寿命を迎えるような長期の耐久性を想定する場合, 断面修復材の内部に犠牲陽極材が設置されていれば, 取換えも困難であるし, 寿命の確認も困難である. そこで, 本研究では, 犠牲陽極材の外部設置の可能性について検討し, 断面修復材の内部に設置する方法よりも, マクロセル腐食が最も懸念される断面修復材と躯体コンクリートとの界面付近の鉄筋を防食する効果が高いことを示した.

さらに外部に設置することで, 「取換え」および「性能の確認」が容易になる利点があると考えられる. 犠牲陽極材を外部に設置していれば, 設置部分を取り外すことができ, 犠牲陽極材の取換えも可能である. また, 外部にリード線等の導線が露出するので, リード線に自然電位計や無抵抗電流計などを接続すれば, 防食性能を発揮しているかどうかの確認も可能になる.

本研究における検討内容から, 図 5.2.2 に塩害劣化を受けたコンクリート構造物の補修を断面修復工法で行う場合の工法仕様選択のフローチャートを示す.

フローチャートでは前半で犠牲陽極材の適用に関する検討を行い, 後半で断面修復工法の断面修復深さおよび断面修復材に混和する塩素固定化材の添加率に関する検討を行う. 全体として大きく 2 つの検討段階に分かれており, 2 つの検討段階で算出される LCC の合計が予定供用期間にかかる LCC の総計となる.

このフローチャートを用いることによって, 本研究で検討した工法の中から, 環境条件により

最適な断面修復深さ、断面修復材中の塩素固定化材の添加率や犠牲陽極材の設置位置を選択することができる。以下、フローチャートについて説明する。

①断面修復工法の適用

塩害を受けるコンクリート構造物の補修工法として、土木学会編「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」に示される補修工法の選定方法により、断面修復工法が選定される場合に本フローチャートが適用される。

②予定供用期間の設定

対象となるコンクリート構造物の予定供用期間は、構造物の重要度、構造物にかけられる予算や管理の難易などの面から管理者が設定する。

③対象構造物の躯体コンクリート圧縮強度

対象となるコンクリート構造物の圧縮強度は、補修工法を選定する際の調査診断等でコンクリートコアによる調査やテストハンマーによる非破壊調査などで推定された強度を考慮するものとする。圧縮強度は図 5.2.1 で示した鉄筋防食範囲のコンクリートで検討すべきであるが、それが難しい場合は同じ部材のコンクリートであれば同一であるとみなして検討する。

躯体コンクリート強度が 21N/mm^2 以上 50N/mm^2 以下であれば、鉄筋防食性能は環境条件により異なるので次のステップに移動する。なお、本フローチャートで対象となる圧縮強度が 50N/mm^2 を超える場合もしくは 21N/mm^2 未満の場合は、本研究では検討を行っていないので、適用性について更なる検討を行い、適切に判断するものとする。

④供用期間中に想定される鉄筋位置での最大塩化物イオン量

暴露される環境において、土木学会編「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」に示される塩化物イオン浸透予測解析を実施し、予定供用期間中に鉄筋かぶり位置におけるコンクリート中の全塩化物イオン量で検討を行う。躯体コンクリート中の塩化物イオン量が 10kg/m^3 までであれば、環境温度により鉄筋防食性能が異なるので、次のステップに移動する。塩化物イオン量が 10kg/m^3 を超える場合は、本研究では検討を行っていないので、適用性について更に検討を行い、適切に判断するものとする。

⑤環境温度

構造物が暴露される環境温度については、年間を通じて塩害による鉄筋腐食が最も進行する平均気温が最も高い夏期の月平均気温を指標とする。年平均気温ではなく夏期の月平均気温を判断基準として設定し、犠牲陽極材による鉄筋防食性能は常に 35°C および 20°C の環境温度で試験した結果を反映することで、安全側の判断ができるものとする。

躯体コンクリートの圧縮強度が 21N/mm^2 以上 50N/mm^2 以下の場合、環境温度が 35°C までであれば、躯体コンクリート中の塩化物イオン量が 10kg/m^3 でも犠牲陽極材による鉄筋防食および腐食抑制効果が期待できる。躯体コンクリートの圧縮強度に関わらず、環境温度が 35°C を超える場合は、本研究では検討を行っていないので、適用性について更に検討を行うものとする。

⑥犠牲陽極材設置位置（外部 or 内部）の違いによる犠牲陽極材の劣化解析および LCC 算出

4.6 節で示した犠牲陽極材を設置した場合の鉄筋防食範囲にある鉄筋の電位および電流の解析を実施する。加えて、劣化を模擬した犠牲陽極材を用いた場合における鉄筋の電位および電流の

解析を実施し、犠牲陽極材の経時的な劣化について解析的検討を行う。それを踏まえ、犠牲陽極材の外部設置か内部設置の違いによる LCC を算出し、予定供用期間において LCC が小さいほうの設置位置を決定する。

なお、犠牲陽極材の内部設置を採用する場合は犠牲陽極材の交換ができないことを許容することを前提とする。

⑦断面修復深さと断面修復材中の塩素固定化材添加率の違いによる塩化物イオン浸透量解析および LCC 算出

3.4 節で実施した断面修復深さと断面修復材中の塩素固定化材混和率別の塩化物イオン浸透量についての数値解析を実施し、各ケースにおいて鉄筋位置における全塩化物イオンが発錆限界値まで達する期間を求める。それを踏まえ、各ケースの LCC を算出し、LCC が最小となる予定供用期間における断面修復深さと断面修復材中の塩素固定化材混和率のパターンを決定する。

なお、本フローチャートで決定される断面修復工法の仕様における LCC の総計は、⑥および⑦で算出される LCC の総計となる。

⑧適用性の更なる検討

本研究で検討を実施した範囲を外れる場合は、犠牲陽極材を併用した断面修復工法の適用性について追加実験等を行って更に検討を実施し、その適用性を確認することとする。

また、対象となるコンクリート構造物の劣化が著しい場合は、他の補強工法や架け替え等の対策を検討する。その場合は、土木学会編「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」の記載に従うものとする。

以上の手順によって、断面修復工法を施工する前の段階から予定供用期間内における LCC が最小となるような断面修復工法の仕様を決定することができる。これは断面修復工法を実施後の犠牲陽極材の取換え時期や断面修復工の再施工時期を決定することも含まれるので、コンクリート構造物の予定供用期間中のシナリオデザインを設定していることでもあると考える。なお、このフローチャートによるシナリオデザインの設定は、断面修復工法を実施する前の段階で検討するものであり、実際に断面修復工法を適用した後の供用期間中に暴露環境条件が変化した場合や、予定供用期間そのものが変更になった場合などについては改めて検討を行う必要がある。

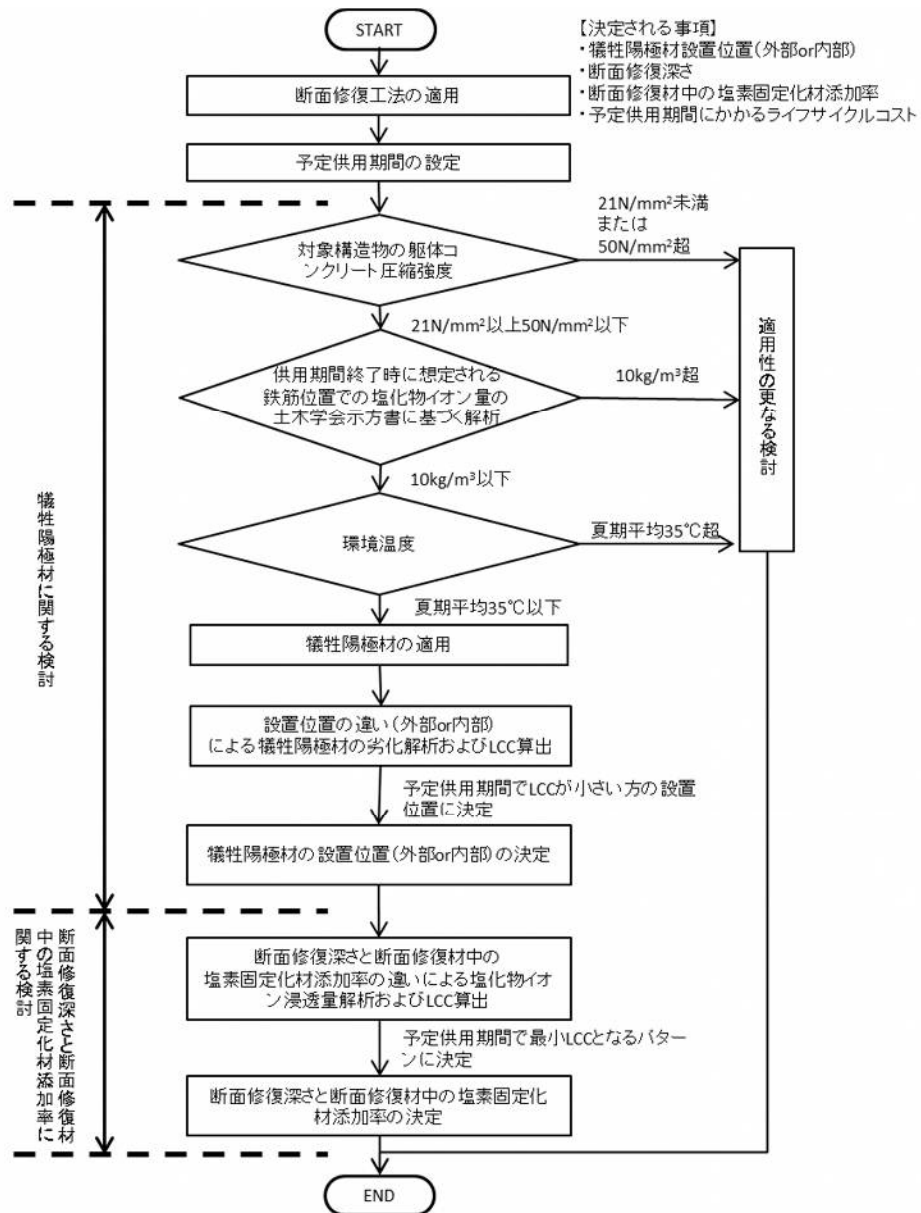


図 5.2.2 断面修復工法における工法選択のフローチャート

(5) 今後の課題

本項で提案した断面修復工法の工法選択のフローチャートをさらに正確で経済的な工法選択が可能なものとするために、以下に課題を示す。

①鉄筋の発錆限界塩化物イオン量に関する検討

鉄筋を直接腐食させる可溶性塩化物イオンを基準とする発錆限界量を明確化する検討が必要である。特に塩素固定化材を混和した断面修復材は、硬化体中の可溶性塩化物イオン量を大きく低減する効果が高い。可溶性塩化物イオンを基準とする発錆限界量というものが確立できれば、より正確で効果的な塩害対策を提案できるようになるものと考ええる。

②暴露環境と鉄筋腐食の関係に関する検討

塩害を受けるコンクリート構造物の暴露環境が鉄筋腐食に与える影響、特に湿度が 40%以下の

低い場合に鉄筋腐食に与える影響が不明確であるので、その点を明確化し、フローに反映する検討が必要である。

③犠牲陽極材の耐久性に関する検討

数値解析検討や実際に消費される電荷から犠牲陽極材の耐久性を算出したが、6 か月程度の試験期間から求めたものであり、今後も長期間試験することにより、より正確な耐久性の算出の検討を続けていくことが必要となる。

④鉄筋面積が異なるときの犠牲陽極材の鉄筋防食性能に関する検討

本研究では、鉄筋比 1.3%の鉄筋コンクリートの供試体しか試験を実施しておらず、さらに鉄筋比が大きくなった場合や、床版などの面的な広がりを持った場合には、犠牲陽極材の鉄筋防食性能が本研究結果とは異なることが考えられる。今後、鉄筋面積が異なる供試体の試験を追加して、防食対象となる鉄筋面積が異なるときの検討が必要となる。

⑤犠牲陽極材を併用した断面修復工法の適用範囲に関する検討

犠牲陽極材を併用した断面修復工法の適用範囲について、躯体コンクリート強度、躯体コンクリート中の塩化物イオン量および環境温度を指標にした場合の概念図を図 5.2.3 に示す。

本研究を通して、塩害を受けたコンクリート構造物に適用する犠牲陽極材を併用した断面修復工法には、一定の適用範囲が存在することが分かった。具体的には、躯体コンクリート強度が低く、塩化物イオン量や暴露環境温度が高いような鉄筋腐食が激しくなる条件では、適用が難しくなる場合がある。

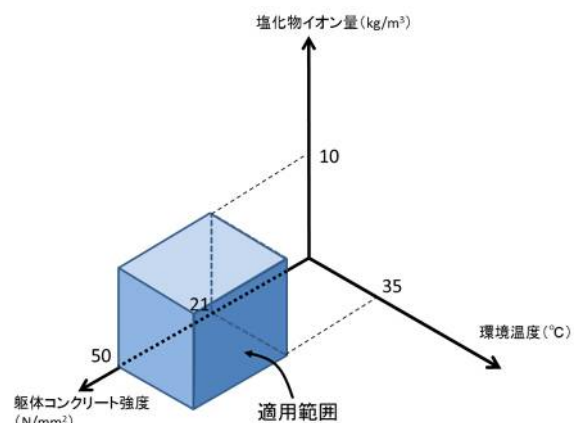


図 5.2.3 犠牲陽極材を併用した断面修復工法の適用範囲の概念図

一般には躯体コンクリート強度が低い構造物の方が、塩化物イオンなどの劣化因子が侵入しやすく、鉄筋防食対策を行うべき対象の数も多いものと推察される。断面修復工法と併用する犠牲陽極工法は、犠牲陽極材によって鉄筋防食を行うので、メンテナンスの負担が小さい、外部電源型の電気防食工法や電気化学的脱塩工法等と比較して初期コストが小さいなどのメリットも多い。本研究では、犠牲陽極材をコンクリート表面に外部設置することにより、従来実施されてきた内部設置よりも適用範囲が広がる可能性を示した。

今後の課題として、犠牲陽極材を併用した断面修復工法の適用範囲をさらに拡大するため、犠牲陽極材中の犠牲陽極金属そのものについて検討することや、犠牲陽極金属の反応性を長期に維持できるようなバックフィル材の開発などの検討を行うことで、さらに犠牲陽極工法の適用範囲を広げるようにしていきたい。

【参考文献】

- 1) チャンドックヒュウ, 李春鶴, 郭度連: 相対湿度が RC 部材の鉄筋腐食に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会第 68 回年次学術講演会, V-214, pp.427-428, 2013

謝 辞

京都大学大学院教授・宮川豊章先生には、本研究の遂行ならびに本論文の執筆について、終始、懇切かつ丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました。宮川先生におかれましては、筆者のような至らぬ者にも愛情をもってお導きをいただきました。先生のご指導を頂いたことは筆者にとって生涯の宝です。衷心より感謝を申し上げます。京都大学大学院教授・河野広隆先生、同准教授山本貴士先生には、本論文の取りまとめ、審査を通じて貴重なご指導、ご助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。京都大学大学院准教授・安琳先生には、研究の過程において貴重なご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。京都大学大学院助教・高谷哲先生には、論文の作成に当たり貴重なご示唆やご助言をいただきました。心より厚く御礼申し上げます。京都大学・三木由有氏には事務面から絶大なるご支援をいただきました。深く感謝の意を表します。金沢工業大学教授・宮里心一先生、九州大学大学院教授・濱田秀則先生、徳島大学大学院教授・上田隆雄先生には研究の遂行にあたって貴重なご助言と励ましの言葉をいただきました。心より感謝申し上げます。

また、広島大学名誉教授・田澤榮一先生、同・米倉亜州夫先生、広島大学大学院特任教授・佐藤良一先生、広島大学大学院教授・河合研至先生には、筆者が学生の時に取り組んだ卒業論文、修士論文のご指導を通じてコンクリート工学の奥深さをお教えいただき、また、筆者がこの世界に足を踏み入れるきっかけを与えてくれました。厚く御礼申し上げます。

本論文は、筆者が勤務先である電気化学工業株式会社で取り組んでまいりました研究の成果を基に、京都大学大学院工学研究科博士後期課程において取り組んだ一連の成果を取りまとめたものです。

電気化学工業株式会社取締役常務執行役員・宇田川秀行氏、電化創新（上海）商貿有限公司総経理・辻均氏、同副総経理・寺村悟氏、電気化学工業株式会社インフラ・無機材料部門事業推進部長・石田積博士、同特殊混和材部長・白山裕氏、同技術課長・入内島克明氏、同青海工場セメント・特混研究部長・盛岡実博士、同主席研究員・上村豊氏の各上司の方々には、博士後期課程への編入学の機会を与えていただき、また研究の遂行に関してご理解、ご支援をいただき、また、本論文の取りまとめに際してもご配慮や貴重なご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

また、筆者が編入学する前に惜しくも他界された元電気化学工業株式会社青海工場無機材料研究部主幹研究員・故芦田公伸博士からご生前に頂いた励ましの言葉は、研究の遂行に際して何よりの励みになりました。心より感謝申し上げます。

本研究の一部は、鹿児島大学と電気化学工業株式会社の共同研究で取り扱った内容を含んでおります。鹿児島大学大学院教授・武若耕司先生，同・山口明伸先生におかれましては，塩素固定化材の性能評価に関し，貴重なご助言およびご示唆を頂きました。深く感謝の意を表します。

また，株式会社ナカボーテック・篠田吉央博士，大谷俊介博士，田中一弘氏には分割鉄筋による評価手法について，貴重なご助言とご示唆を頂きました。心より感謝申し上げます。

電気化学工業株式会社デンカイノベーションセンター先進技術研究所構造物性研究部・戒崎遼博士，同インフラソリューション開発研究所・栖原健太郎博士には，犠牲陽極材の鉄筋防食効果に関する数値解析および塩素固定化材を混和した断面修復材の塩化物イオン浸透に関する数値解析について，多大なるご協力をいただきました。心より御礼を申し上げます。同インフラ・無機部門特殊混和材部・松久保博敬氏には犠牲陽極材の性能評価に関する電気化学的な測定方法を一からご教授いただきました。感謝の意を表します。

筆者が所属する青海工場セメント・特混研究部のプレミックスグループをはじめとする皆様には研究の遂行にあたり，供試体の作製，データの測定などについて多大なるご協力を賜りました。ここに厚く感謝申し上げます。

京都大学大学院博士後期課程に同時期に在籍した西日本旅客鉄道株式会社・近藤拓也博士，清水建設株式会社・田中博一博士，株式会社ピーエス三菱・小林仁博士，株式会社IHIインフラ建設・山下亮博士，独立行政法人土木研究所・河野哲也博士，一般財団法人日本塗料検査協会・山田卓司博士，西日本旅客鉄道株式会社（現・株式会社レールテック）・村田一郎博士，三井住友建設株式会社・室田敬博士，同佐々木亘博士，西日本高速道路株式会社・本荘清司氏，株式会社国際建設技術研究所・葛目和宏氏，西日本旅客鉄道株式会社・吉田隆浩氏，ショーボンド建設株式会社・三村典正氏には，宮川研究室の月1回のドクターミーティングでの議論を通じて，たくさんの新しい発見や貴重なご示唆・ご助言をいただきました。皆様と交流を深めるなかで，自身の見識も深まっていったと実感しております。心より御礼申し上げます。特に葛目氏は同期入学ということもあり，大学生活における様々な場面でご助力をいただきました。重ねて御礼申し上げます。

最後に，実家より常にあたたく見守ってくれた両親，筆者の論文執筆を応援してくれた長女・恋花，次女・姫花と今年2月に生まれたばかりの長男・正道，生まれたばかりの子供がいて大変だったにも関わらずいつも筆者を励まし，サポートしてくれた妻・華絵に深く感謝の意を表し，本論文の謝辞といたします。